

# 生徒向け分子生物学実験教材のレビュー

## A review of molecular experiments developed for students

三宅 崇

MIYAKE Takashi

[キーワード Keyword] 高等学校, 生物教育, 電気泳動, DNA, PCR  
[所属 Institution] 岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University)

[要旨 Abstract] 高等学校の「生物」では、「遺伝情報の発現と発生」の単元において、遺伝子を扱う技術について学習する。この内容に関わる実験教材としてPCRおよび電気泳動を含むものを、現在報告・市販されている教材やキットについて調べた。それらは、実験作業のステップにより4つに類型化された。また、教材の目標としては、原理の理解と有用性の理解が想定されたが、前者は教材が少なく、まだいくつも開発する余地があると考えられた。一方で、有用性の理解を目指す教材は4つの類型すべてでみられた。今後の発展として、探究活動としての実験について検討した。

### 1. はじめに

高等学校の「生物」では、「遺伝情報の発現と発生」の単元において、遺伝子を扱う技術について学習する。高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説の理科編理数編には、「遺伝情報の発現と発生」の単元内にある「遺伝子を扱う技術」の目標として、「遺伝子を扱う技術について、その原理と有用性を理解すること。」と記述されており、具体的には「制限酵素、ベクター及び遺伝子の増幅技術に触れること。また、それらが実際にどのように用いられているかについても触れること。」ということが挙げられている（文部科学省2021）。すなわち、1）制限酵素やプラスミド、PCRの増幅技術の原理の理解と、2）それらの応用としての有用性の理解が目標とされており、実験や資料提示はそれらの理解を助けるものと位置づけられる。

以上を踏まえて、様々な実験教材が提案されている。それらは、大別すると①遺伝子組み換え技術と、②増幅技術およびそれを分析する技術としてのPCRおよび電気泳動、に分けられる。①については緑色蛍光タンパク質（Green Fluorescent Protein, GFP）を利用した市販のキットが広く用いられているようである。遺伝子組換えに関しては関連する法令もあり、教員側で変更・改変の余地は多くないと思われる。一方、②については様々なバリエーションがあり、さらには工夫や改変の余地も多い。実際、②の技術を用いて、SSH（スーパーサイエンスハイスクール）の探究活動の一環で、あるいは自然科学部の活動として未解明の問題に取り組んだ研究を学会等で発表する事例もみられ、理数探究などの探究活動にも結び付けられる可能

性を秘めている。そこで本稿では、②に絞って、現在報告・市販されている教材やキットについて類型化し、今後の発展の可能性について提案する。

### 2. 調査方法

教科書、開発教材、市販されているキットについて、DNA分析実験（DNAを電気泳動した泳動像を観察する実験を含むもの）を対象とした。開発教材に関する論文や報告については、Google Scholar（<https://scholar.google.com/>）およびCiNii（<https://ci.nii.ac.jp/>）において、「電気泳動」「教材」「PCR」「生徒」「学生」などのキーワードを適宜組み合わせ合わせて検索し、該当するものを抽出した。学会要旨や開発を伴っていない実践報告は除外した。また、「教材」という語はタイトルにあるものの、単に新規の材料にあるプライマーを用いてPCR増幅がうまく方法を確立した、あるいは、工夫して時間短縮を試みた、といった報告の場合は除外した。また、対象論文に引用されている論文についても、該当するものは含めた。市販されているキットについては、Googleで上記のキーワードに「キット」「kit」などを含めて検索するとともに、バイオラッド、ニッポンジーン、フナコシ等のメーカーや販売店のウェブサイト内でも検索を行った。

集められた実験教材は、実験の流れ、すなわちどのようなステップを含む教材かによって類型化した。また、原理の理解を目的としたものか、有用性の理解を目的としたものかによっても分類した。

3. 結果と考察

教科書から5本、市販キットから12本、論文等から

11本の実験教材が確認された(表1)。5社の教科書の中には、該当する実験教材がみられないのも1社

表1 教科書、開発教材、市販されているキットにおけるDNA分析実験

対象	増幅領域	実験の流れ	理解の対象	実験の補足	実験結果	結果から読み取る内容	出典	
<b>教科書</b>								
1	1 フアージ	—	B	原理	制限酵素断片	制限酵素断片の長さ(対数軸)と移動距離の関係が直線になることを確かめる	庄野ほか(2020)	
2	プラスミドpUC19	—	B	原理	制限酵素断片	ラダーマーカーのバンドの塩基対数と移動距離の関係から、制限酵素断片の塩基対数を推定する	本川ほか(2019)	
3	1 フアージ	—	B	原理	制限酵素断片	ラダーマーカーのバンドの塩基対数から制限酵素断片の塩基対数を概算し、制限酵素地図上の断片との対応を確認する	吉里ほか(2020)	
4	イネ	WKA9LとB43(マルチプレックス)	C	有用性	品種により各サイズのバンドの増幅の有無が異なる	試料の品種を判定する	吉里ほか(2020)	
5	ブタ	指定なし	C	?	抽出済みDNA	—	嶋田ほか(2020)	
<b>市販キット</b>								
6	?	—	A	有用性	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	試料の遺伝子型を判定する	DNA Paternity Testing Simulation Kit, for Education <sup>3</sup>	
7	?	—	B	有用性	試料により制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる	遺伝の仕組みから父親を特定する	電気泳動パターンからプラスミドを特定 Dr. ジーン8 DNA鑑定キット <sup>4</sup>	
8	1 フアージ	—	B	原理	制限酵素断片	ラダーマーカーのバンドの塩基対数と移動距離の関係から、制限酵素断片の塩基対数を推定する	ラダーマーカーの塩基対数と移動距離の関係から、制限酵素断片の塩基対数を推定する	Dr. ジーン2 アガロースゲル電気泳動キット <sup>4</sup>
9	1 フアージ	—	B	原理	制限酵素断片	ラダーマーカーのバンドの塩基対数と移動距離の関係から、制限酵素断片の塩基対数を推定する	DNA 断片分析キット <sup>5</sup>	
10	プラスミド <sup>2</sup>	—	B	原理	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	試料の遺伝子型を判定する	法医学DNAフィンガープリント法キット <sup>5</sup>	
11	ヒト(生徒)	MCT118 (DIS80)	C	有用性	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	試料の遺伝子型を判定する	PCR-based VNTR Human DNA Typing Kit, for Education <sup>3</sup>	
12	ヒト	MCT118 (DIS80)	C	有用性	抽出済みDNA	試料の遺伝子型を判定する	PCR-based DNA Fingerprinting Kit, for Education <sup>3</sup>	
13	ヒト(生徒)	PV92遺伝子座(Alu配列の有無)	C	有用性	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	試料の遺伝子型を判定し、遺伝子頻度を計算する	PV92 PCR/informaticsキット <sup>5</sup>	
14	キット内のDNA <sup>2</sup>	BXP007(架空)	C	有用性	抽出済みDNA	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	犯罪捜査用PCRベベシックキット <sup>5</sup>	
15	イネ	?	C	有用性	簡易抽出DNA	試料の品種を判定する	コシヒカリ鑑定団 <sup>6</sup> (DNA実験キット/学生実験用)	

あり、逆に該当教材が2本掲載されているものも1社みられた。

### 3.1. 実験の流れによる類型化

実験の流れによって類型化した結果、PCRを行うか

表1のつづき	16 食肉	17 植物	論文等	18 カイコ	19 ヒト (生徒)	20 ホウレンソウ	21 ファーストブラント	22 トウモロコシ	23 パラ, カーネーション <sup>1</sup>	24 ヒト (生徒)	25 ヒト (生徒)	26 ヒト (生徒)	27 ヒト (生徒)	28 ダイコン, クレス, プロッコリーほか	
	cyfB (マルチプレックス)	trnH-psbA (葉緑体)		W染色体特異的ブライマー	MCT118 (D1S80)	ジベレリン (GA) 合成酵素	VNTRマーカークー (D9Braps1)	マイクロサテライトマーカークー	フラボノイド 3',5'水酸化酵素 (マルチプレックス)	ALDH2	耳垢遺伝子	耳垢遺伝子 (ABCC11)	毛髪形態 (EDAR) 遺伝子	SOX2	ゼブラフィッシュ
	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	手動PCR	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	簡易抽出DNA	ダイレクトPCR	ダイレクトPCR	ダイレクトPCR	ダイレクトPCR	ダイレクトPCR
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	D	D	D	D	D
	有用性	?	有用性	有用性	有用性	原理	有用性	有用性	有用性	有用性	有用性	有用性	有用性	有用性	有用性
	種により各サイズのバンドの増幅の有無が異なる	種によりPCR産物長が異なる	種によりPCR産物長の増幅の有無が異なる	雌雄により増幅の有無が異なる	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	ブライマーの有無により増幅の有無が異なる	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	アレルによりPCR産物長が異なるため、試料によりバンドパターンが異なる	試料により各サイズのバンドの増幅の有無が異なる	アレルにより増幅の有無が異なる (C)	アレルによりPCR産物の制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる (D)	アレルによりPCR産物の制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる	アレルによりPCR産物の制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる	種によりPCR産物の制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる	種によりPCR産物の制限酵素断片長が異なるため、バンドパターンが異なる
	PCR産物長から肉種を判定する	植物種によりPCR産物長に違いがあることを確認する	植物種によりPCR産物長の増幅の有無を確認する	試料の雌雄を判別する	試料の遺伝子型を判定する	個人 (犯人) を特定する	ブライマーの働きを理解する	試料の遺伝子型を判定し、F2での分離比を計算することで遺伝の法則を理解する	試料の遺伝子型を判定する	PCR産物長から組み込んだ遺伝子特定する	試料の遺伝子型を判定する	遺伝子型と表現型の対応を確認する	試料の遺伝子型を判定する	遺伝子型と表現型の対応を確認する	生物種により制限酵素認識配列位置が異なることから、塩基配列が異なることを確認する
	肉種判別検査用PCRキット お肉鑑定回 <sup>6</sup>	Dr. ジョーンズ 植物多型解析PCRキット <sup>4</sup>		杉村ほか (2015)	末本ほか (2007)	園山・暹美 (2018)	濱田ほか (2017)	奈良 (2015)	山内 (2013)	伊左治・松本 (2006)	林田ほか (2010b)	林田ほか (2010a)		井上ほか (2017)	三宅・大井 (2020)

<sup>1</sup> 検出するのは導入されたバンジーとベチュニア由来の遺伝子

<sup>2</sup> ヒト由来のDNAではないが、ヒトという想定で用いている

<sup>3</sup> Edvotek社のもので、フナコシが販売している

<sup>4</sup> ニッポンジーン

<sup>5</sup> バイオラッド

<sup>6</sup> ビジョンバイオ

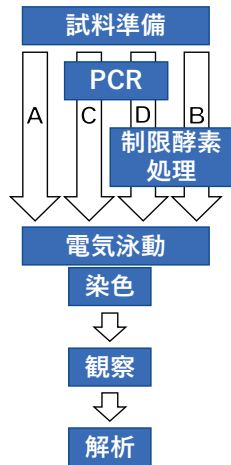


図1 DNA分析実験教材の類型

どうか、および制限酵素処理を行うかどうかにより、図1のような4つに大別できた。すなわち、与えられた試料を直接電気泳動にかけるもの(A)、制限酵素で切断した後に電気泳動にかけるもの(B)、PCRを行い電気泳動にかけるもの(C)、PCRを行い増幅産物を制限酵素で切断した後に電気泳動にかけるもの(D)である。一方で、電気泳動後については教材によって染色方法等に違いはあるものの、実際には相互互換が可能であるため、本質的な違いではないと判断された。そこで、電気泳動までのステップに基づいて精査した。

Aのタイプは市販のキットで1つのみ見られた。この教材は父親判定の原理を理解することに特化したものと言えよう。これはその原理が理解できれば良いので、実際に含まれている増幅産物は、想定しているものとは異なるものを用いていた(表1の6)。

Bのタイプは市販のキットおよび教科書でみられた。ほとんどは、あらかじめ単離生成されているプラスミドや入ファージのDNAを制限酵素で処理することで、断片化されたDNAの電気泳動パターンを読み取り、それぞれのバンドの移動距離を計測し、あらかじめ示されているバンドの塩基対数と移動距離の関係を見出すという作業を含んでいる。関係を見出すことで終わっている教材もあるが(表1の1)、多くはその関係から他のレーンのバンドの塩基対数を推定する作業が引き続き求められていた。それ以外のものとしては、複数の遺伝子試料(A, B, C, X)を制限酵素で処理し、断片化されたDNAの電気泳動パターンを見ることで、Xがどの遺伝子と同じかを判定する、というものが見られた(表1の7)。これは、後述するDにおいてPCRより後の部分のみを抽出した教材とみることも可能である。PCRに続いて制限酵素処理を行うDの場合は、当

然ながらPCRが失敗すると結果が得られない可能性があるため、試料間の塩基配列の違いによる制限酵素断片長の多型を確実に観察することを重視するならば、このような教材も有効かもしれない。

Cのタイプは教科書、市販のキット及び論文等のすべてでみられたが、内容にはかなりのバリエーションがみられた。

作業に関しては、まず鋳型DNAの準備について、はじめから準備されているもの、直接試料の破片等を入れるもの、簡易的なDNA抽出法を用いるもの、従来の方法でDNA抽出を行うものなどに分けられた。直接試料を入れるダイレクトPCRは、試料やDNAポリメラーゼキットにも依存するため、既にうまくいくことが明らかかな材料で行うことが賢明であろう。また、抽出作業が含まれている教材であっても、それを生徒が行うか教員が行って準備しておくかは時間や目的次第で変更可能である。

PCRについては、一般的な1セットのプライマーを使うもの以外に、マルチプレックス(複数のプライマーセットを同時に使い、一つの反応液で複数の遺伝子領域をターゲットとする方法)がみられた(表1の4, 16, 23)。ただし、複数種類のプライマーがはじめから混合された状態のものを添加する教材の場合、増幅産物とプライマーの関係をきちんと理解させられるかどうかは難しそうに思われた。

得られる結果については、まず種や品種間で増幅の有無が異なるものがみられた。例えばカイコの性染色体であるW染色体特異的な座位を増幅するプライマーでPCRを行うことで、雌雄が判別できる(表1の18; 杉村ほか 2015)。増幅がみられるのはZW型である雌で、増幅がみられないのはZZ型である雄ということになる。肉の種類を特定する教材(表1の16)の場合、増える・増えないだけでなく、例えば豚肉かそうでないかの二択にしかならないため、マルチプレックスPCRにすることで、長さがXのバンドが得られたら豚肉、長さがYであれば牛肉、長さがZであれば鶏肉、といった判定ができる。したがって、増幅産物長が明瞭に区別されるようにプライマーが設計されている(Matsunaga et al., 1999)。

アレルによって産物長が異なることを利用している教材も多い。この場合は基本的にバンドが2本得られ、それにより試料の遺伝子型が判定される。これを遺伝の法則(分離の法則)やハーディ・ワインベルグの法則の理解につなげるものや(それぞれ表1の21, 13)、犯人推定や父親判定などにつなげるものがみられた



(例えば表1の11, 12, 19)。また、この場合も、原理の理解に重点を置いて、想定している材料(ヒト)とは異なる由来のDNAを用いた教材もみられた(表1の14)。また、アレルによって配列が異なることを利用し、その異なる配列を含むようにプライマーを設計することで、増幅の有無からそのアレルの有無を判定するPCRはアレル特異的PCRと呼ばれる。これを2つのアレルそれぞれに対して行うことで、遺伝子型を判定する教材もみられた(表1の24)。

上記とは異なるものとして、加えるプライマーの組み合わせによりバンドが得られるかどうかを調べる教材があった(表1の20)。これは次項で述べるようにPCRの原理の理解に重点を置いたものである。

Dのタイプは、PCR増幅産物の制限酵素断片長がPCR増幅産物内の塩基配列の違いによって生じることを利用したもので、一般的にはPCR-RFLP(Restriction Enzyme Length Polymorphism: 制限酵素断片長多型)と呼ばれる手法である。このタイプは教科書や市販のキットにはみられず、論文等のみみられた。

Dにおいても、鋳型DNAの準備のバリエーションはCと同様にみられた。得られる結果についても、Cと同様に種により異なるもの(表1の27, 28)と、アレルにより異なることで遺伝子型が判定できるものがみられた(表1の24, 25, 26)。

### 3.2. 理解の対象からみた分類

最初に述べたように、「遺伝情報の発現と発生」の単元内にある「遺伝子を扱う技術」の目標は、「遺伝子を扱う技術について、その原理と有用性を理解すること。」とされている。すなわち、1) 制限酵素やプラスミド、PCRの増幅技術の原理の理解と、2) それらの応用としての有用性の理解が目標とされており、実験や資料の活用はそれらの理解を助けるものと位置づけられる。

いくつかの教科書や市販キットで、制限酵素処理を行い、電気泳動像から断片の長さや移動距離の関係を見出すという教材があった(表1の1, 2, 3, 8, 9)。この実験は、作業としては初歩的であるが、先の1)に照らし合わせて、制限酵素の原理の理解を促しているかということ、疑問が残る。なぜなら、ほとんどの教材では、実際の塩基配列を示して、そこから切断部分を見出しさせて断片の長さを予測させているというわけではないからである。従って、「特定の塩基配列を認識してDNAを切断する」という制限酵素の原理の理

解を促す実験とは言い難い。

そのように考えると、厳密に原理の理解そのものに焦点をあてた実験は園山・渥美(2018)が唯一だと思われる。この研究では、2種類のプライマーを、一方だけ入れたり、両方入れなかったりという組み合わせにより、フォワード側とリバース側の2種類のプライマーの存在が必要であるという教材を報告した。詳細は園山・渥美(2018)を参照していただきたいが、各教科書の図解説明を観察し、フォワード側とリバース側それぞれに、異なる塩基配列部位に相補的に結合するプライマーが必要であることが必ずしも明瞭に理解されないことを補完する意味で教材が作られている。

もちろん、有用性を目的とした実験であっても、それを行う作業を通して、原理が理解できるという考え方はある。しかし、小中学校で行われる理科実験が、実験を通して原理や概念を理解させているものが多いことを考慮すると、「有用性」が目標とされているこの単元では、実験教材の役割が大きく異なっているように思われる。

PCRという増幅技術では、高温での二本鎖の一本鎖への解離(変性)、特定の温度での一本鎖DNAとプライマーDNAとの相補的な結合(アニーリング)、特定の温度でのプライマーDNAの3'末端に続く相補鎖の伸長の3つの反応が繰り返されることでDNAが増幅する。これらの原理の理解を実験の目的とするような実験教材のバリエーションがもっとあっても良いと思われる。DNA組換え実験も含め、この分野の実験は、生徒や学生が実験の意味をきちんと理解していないことがあることがしばしば指摘される(伊藤・大高 2010; 井上ほか 2017)。それを踏まえると、PCRにより増幅される領域やプライマーの結合部位を塩基配列とともに示すことは重要であると思われる。

また園山・渥美(2018)が着目した点以外にも、変性処理の有無、異なるアニーリング温度、試験問題で誤答とされる選択肢の塩基配列(向きが異なるなど)のプライマーの選択など、増幅産物の有無に関係する変数を変える設定を通して、原理の理解が深まる教材が構築可能であろう。

有用性の理解を目的とした実験教材は、教科書では少なく、イネの品種を判定できるという教材が唯一であった。対照的に、論文等では多くの実験教材が有用性の理解を目的としたものであった。内容としては試料の遺伝子型判定を行うものと、試料の種あるいは品種を判定するというもので、これらは実際に研究レベルでも頻繁に行われているものである。

遺伝子型判定を行うものでは、特定の配列の繰り返し数が異なる（表1の11, 12, 19, 21, 22）、あるいは転移因子の挿入の有無による増幅産物長の多型を利用したもの（表1の13）、塩基の置換を利用したアレル特異的PCR（表1の24）、塩基の置換による制限酵素認識部位の有無を利用したPCR-RFLPがみられた。ただし、特定の配列の繰り返しについては、研究レベルでは2～4塩基対の繰り返し数が異なるマイクロサテライト領域（縦列型反復配列（short tandem repeat；STR）あるいは単純反復配列（simple sequence repeat；SSR）とも呼ばれる）を用いることが多いが、アガロースゲル電気泳動では区別できないため、その利用は限定的であった。

*ALDH2*や*PV92*を利用した実験では、ある程度の試料数があれば、ハーディ・ワインベルグの法則への適用が可能である（山本ほか 1993；林田ほか 2015）。また、植物のように容易に次世代が育成可能な材料であれば、遺伝の法則と関連付けることも可能である（奈良 2015；濱田ほか 2017）。また、*ALDH2*の場合は、アルコールパッチテストを行うことで表現型と対応付けられ、分子生物学的手法での判定が正しいかある程度判断できることも利点である。

種内の塩基の置換の多くは、一塩基多型（Single Nucleotide Polymorphism；SNPs）と呼ばれるもので、実際には様々な解析法が存在する（猪狩・村田 2012）。しかし、アガロースゲル電気泳動で結果が確認できることと、制限酵素の有用性も学べるという点で、次項でも述べるようにPCR-RFLPは有効な実験教材と考えられる。

### 3.3. 探究活動としての実験

表1にまとめた教材のほとんどは、既に確立した方法をそのまま行うことで、結果を得ることが想定されている。例えば、有用性の理解を目的とした実験教材では、未知の試料が渡され、実験によって遺伝子型や種・品種が判定され、答え合わせが行われて、それが正しく判定されていることから、その手法の有用性が実感できるといった具合である。実験での一連の作業に有用性を付与したのは、教材を開発した人であり、生徒はその有用性を確認し、実感する役である。しかし、準備する教材にあえて曖昧な部分を残すことで、実験を実施する者が工夫する必要がある状況を作り出し、探求としての取り組みとする（『理科の教育』編集委員会 2019）という教材を提案したい。それにより、実験に有用性を付与するのが生徒自身になりうるので

ある。

三宅・大井（2020）（表1の28）では、複数の野菜をPCR-RFLPで判定する方法を学生や生徒に立案させる、という教材を提案した。この教材では、試料である複数種の野菜のDNAを鋳型として、準備されたプライマーによるPCRを行うと、同じ長さ増幅産物が得られる。そして、アラインメント（整列）された塩基配列情報から、それぞれの野菜を区別するために、どのような制限酵素で処理すればよいかを立案させ、実験を行うというものである。すなわち、塩基配列情報から制限酵素を選択するという部分が最初は未決定の状態なのである。従って、プロジェクトの目標を設定して、その目標の実現のために考えることで、思考力や実践力などを修得するプロジェクト学習と位置づけられる。

この教材は、学部生の実習や免許状更新講習でも行ったが、実験の原理を理解した上であれば、グループ内の対話を通じた学習にもつながり、実験によって有用性が判定できる点で探究として機能していたという印象であった。さらに時間をかけた探究活動として取り組めるのであれば、オンライン上のデータベース（GenBankなど）から塩基配列をダウンロードしてアラインメントする作業等を加えることも可能であり、探究活動として取り組むレベルも調節可能である。

このような可能性を追求するために、学生の卒業研究では、同様の教材の開発を様々な“区別しにくい”食材間で検討した（西川 2021）。その結果、バレンシアオレンジジュースと温州みかんジュース、緑豆もやしと大豆もやし、米粉と小麦粉、カタクチイワシとマイワシ（いずれも煮干し）などで、適当な増幅部位を決定して、配列情報から適切な4塩基認識の制限酵素を予測できる教材を開発することができた。「見た目では区別しにくい紛らわしいもの」をふさわしい候補とするのであれば、他にもロブスタ種とアラビカ種のコーヒー豆、そばと韃靼そばのそば茶、大麦とハトムギの麦茶パックなど、たくさんありそうに思われる。DNA、タンパク質配列データの分子進化・系統的解析を行うためのソフトウェアであるMEGAを用いて、オンライン上のデータベースからデータを取得する方法は、主に進化分野の教材の中で紹介されており（風間ほか 2014；浅島ほか 2020）、分子生物学分野でも利用可能になれば、探究活動としての応用が期待されるだろう。

### 4. まとめ

本研究では、生徒向け分子生物学実験教材、とりわ

けPCRおよび電気泳動を含む教材を、作業内容から4つに類型化した。作業のステップはAからDまで、この順に多くなっている。複数の研究で、生徒によるマイクロピペット操作の不慣れに起因する実験の失敗が報告されており、すべてのステップでマイクロピペット操作が含まれるため、ステップが多くなるにつれて難易度も上昇する。とりわけ、PCR溶液調製時の微量操作や、電気泳動ゲルの小さいウェルへの注入は、生徒や学生が困難さを指摘する(園山・渥美 2018; 三宅・大井 2020)。しかし、実験教材のねらいは原理や有用性の理解であり、技術習得ではないのだから、たとえ研究室レベルとは異なる方法であっても、なるべく作業が簡便になるのであれば積極的に取り入れるべきだと思われる(三宅 2022)。

所要時間に関しても同様で、この10年ほどの間に、DNA抽出、PCR、制限酵素処理など、ほぼすべてのステップにおいて、所要時間を短くする改良が行われてきた。今回調査した教材には、かなり精製度の高いDNA抽出を行うものや、染色のステップで一晩要するものなどもみられた。しかし、新たな改良を組み込むことで、既存の実験教材であっても所要時間を大幅に短くすることができる。個々の作業を見直すことで、既存の実験教材をブラッシュアップしたり、改良することで、この単元の実験が身近で多様性を持ったものになることを希望している。

## 5. 引用文献

浅島 他27名 (2020) 改訂生物. 東京書籍. 平成29年検定.  
濱田由鶴・日詰雅博・向平和・中村依子 (2017) PCR法によるDNAマーカーを用いたファストプランツの遺伝実験. 生物教育 59: 26-29.  
林田真梨子・大田智子・増見恭子・村田成範 (2010a) 遺伝子診断教育のための簡便な毛髪形態(EDAR)及び耳垢型(ABCC11)遺伝子多型解析法. 武庫川女子大紀要(自然科学) 58: 43-47.  
林田真梨子・小泉(岩尾)恭子・村田成範・木下健司 (2010b) 遺伝子診断教育のための簡便な耳垢型遺伝子多型解析法. 分析化学 59: 613-617.  
林田真梨子・鎌田由佳・大田智子・児島沙由梨・増見恭子・村田成範・木下健司 (2015) 女子大学生におけるエタノールパッチテストの反応性とALDH2およびADH1B遺伝子多型との関連. 日本衛生学雑誌 70: 134-138.  
猪狩敦子・村田満 (2012) 遺伝子多型・総論(網羅

的解析方法: SNP解析・DNAチップ・GWAS). 日本血栓止血学会誌 23: 436-442.

井上陽子・大友麻子・高橋千果・森屋宏美・大貫優子・谷口泰史・和泉俊一郎・秦野伸二 (2017) 高大連携による高校生のための分子生物学実験の実践―「遺伝子」のより深い理解を求めて―. 生物教育58: 98-113.

伊左治錦司・松本省吾 (2006) 遺伝子診断の教材化: ALDH2(アルデヒド脱水素酵素2)遺伝子におけるSNP(一塩基多型)タイピング. 岐阜大学教育学部研究報告 自然科学 30: 21-33.

伊藤哲章・大高泉 (2010) 遺伝子組換え実験における実験操作の意味の理解の実態: 大学での体験講座における高校生のアンケートから. 理科教育学研究 51: 1-11.

風間智子・山野井貴浩・武村政春 (2014) 身近な野菜を用いた分子系統樹を描く生徒実習教材の開発. 理科教育額研究 54: 319-334.

Matsunaga, T., Chikuni, K., Tanabe, R., Muroya, S., Shibata, K., Yamada, J. & Shinmura, Y. (1999) A quick and simple method for the identification of meat species and meat products by PCR assay. Meat Science 51: 143-148.

三宅崇 (2022) 安価に学生・生徒向けPCR実験を行うための情報. 岐阜大学教育学部研究報告 自然科学 46: 35-43.

三宅崇・大井真菜 (2020) 受講者が立案するPCR-RFLP実験教材の開発. 生物教育61: 96-104.

文部科学省 (2021) 高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編. [https://www.mext.go.jp/content/20211102-mxt\\_kyoiku02-100002620\\_06.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20211102-mxt_kyoiku02-100002620_06.pdf) (2022.1.3 確認)

本川達雄 他17名 (2019) 生物改訂版. 啓林館. 平成29年検定.

奈良尚久 (2015) PCR法, 電気泳動法を用いたトウモロコシの遺伝の規則性の探究. 北海道立教育研究所附属理科教育センター研究紀要 27: 38-43.

西川佳苗 (2021) 制限酵素断片長多型を用いた種判別に関する教材. 令和2年度岐阜大学教育学部卒業論文.

『理科の教育』編集委員会 (2019) これからの理科における教材開発に必要な「探求」の視点. 理科の教育 68: 746.

嶋田正和 他22名 (2020) 改訂版生物. 数研出版. 平成29年検定.

- 庄野邦彦 他18名 (2020) 生物改訂版. 実教出版. 平成29年検定.
- 園山博・渥美茂明 (2018) ポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 法におけるプライマーの働きの理解を目的とした生物授業の実践. 生物教育 59: 158-166.
- 末本哲雄・田中清裕・金井俊輔・笠原茂佳・石上歩・池田紘美 (2007) DNA鑑定を題材とした大学院生中心の出前授業—企画と実施, 留意事項について—. 高等教育ジャーナル—高等教育と生涯学習— 15: 27-44.
- 杉村順夫・尾山廣・森本弘一 (2015) 手動ポリメラーゼ連鎖反応法によるカイコの雌雄判別. 生物教育 56: 29-35.
- 山本健二・藤原敏・上野易弘・小川裕美・西村明儒・足立順子・中川加奈子・福永龍繁・菱田繁・溝井泰彦・龍野嘉紹 (1993) アルコール代謝酵素遺伝子型に基づくエタノール代謝能の個人差の検討. 神戸大学医学部神緑会学術誌 9: 129-131.
- 山内宗治 (2013) 高等学校生物におけるPCR法を利用した遺伝子判定実験取り入れた教材開発: 遺伝子組換え「青いバラ」を可能にした遺伝子の起源の探究を通して. 広島県教育センター研究紀要 40: 117-134.
- 吉里勝利 他20名 (2020) 高等学校改訂生物. 第一学習社. 平成29年検定.