

アブラナ科ファストプランツ *Brassica rapa* 変異体の メンデル遺伝学習教材化に関する研究

The possible application of Fast Plants mutants to learning of Mendel's
Law of Segregation in lower secondary school

西 野 秀 昭

Hideaki NISHINO

福岡教育大学・理科教育講座 (生物)

(平成25年9月30日受理)

Abstract

The two alleles of a gene *Antocyaninless* of FastPlants *Brassica rapa* were applied to learning of Mendel's Law of Segregation as the biological teaching material in Japanese lower secondary school. Cross-hybridization was necessary because seeds can be generated only in cross-fertilization. First, P_1 , purple stem, and P_2 , non-purple stem, were crossed each other. The only one plant was cultured in the pot. Only one pot of P_1 was taken to University student's home and cultured together with only one pot of P_2 because cross-fertilization should be prohibited in the same strain, for example, P_1 each other. The first cross should be performed between only P_1 and P_2 . The F_1 seeds, all of which showed purple phenotype, were cultured as a group of many pots because of the same genetic type of heterologous zygote, and then crossed each other. F_2 seeds, twenty to twenty six, were cultured for 2-3 days on filter paper wetted with tap water in a Petri dish in water-supplied tray under luminescence light. The number of cultured F_2 seed was approximately 500. The three phenotypes, concentrated purple, light purple, and green, were separated as the expression of genotypes of dominant homozygote, heterozygote, and recessive homozygote, respectively. As the results, the phenotype ratio of purple to non-purple was separated into 3 : 1. The expression of genotypes of dominant homozygote, heterozygote, and recessive homozygote, could be also divided into 1 : 2 : 1. The χ -squared test approved the separation ratio in 5%. The period of three months and a half was needed, however, it was suggested that the cross experiment can be carried out in spring to summer or autumn even in lower secondary school.

要 約

ファストプランツのアントシアニンレス遺伝子に注目し、その優性と劣性の二つの対立遺伝子を中学校理科メンデル遺伝における分離の法則の観察実験に応用するためのプロトコルを作成した。ファストプランツは他家受粉で結実する。 P_1 のパープルステムと P_2 のノンパープルステムを交雑する際は、各々の株をポットあたり一つ植えた P_1 と P_2 各々一つずつを学生の家を持ち帰らせ、開花・受粉させた。 P_1 同志や P_2 同志での交配が起こると F_2 での分離比に影響するからである。その結果、 F_1 は全て優性の形質を示した。 F_1 の栽培は集団でまとめて行い、互いに交配させた。 F_2 の発芽は、水道水で湿らせたろ紙を置いたペトリ皿で2日ほど発芽させた。このペトリ皿は水道水を張ったトレイに斜めに置いて給水を切らさないようにした。ペ

トリ皿あたり 20～26 個、計 500 個ほどの F_2 を発芽させた。その後、濃い紫、薄い紫、緑の形質別に乾いた紙上に取り分け、各々の表現型の数を数えた。その結果、紫と緑の表現型は 3:1 に、濃い紫、薄い紫と緑、即ち優性ホモ接合体、ヘテロ接合体、劣性ホモ接合体の各遺伝子型は 1:2:1 に分離していることが確認され、これらの分離比は、危険率 5% で有意な比と言えた。

1. はじめに

平成 20 年 9 月改訂の中学校学習指導要領理科編では、新しく導入された「遺伝の規則性と遺伝子」の単元では次のような目標と内容が掲げられている¹⁾。

イ 遺伝の規則性と遺伝子

(ア) 遺伝の規則性と遺伝子

交配実験の結果などに基づいて、親の形質が子に伝わる時の規則性を見いだすこと。

(内容の取扱い)

ウ イの(ア)については、分離の法則を扱うこと。また、遺伝子に変化が起きて形質が変化することがあることや遺伝子の本体が DNA であることにも触れること。

ここでは、染色体にある遺伝子を介して親から子へ形質が伝わること、及び分離の法則について理解させることがねらいである。

(ア) 遺伝の規則性と遺伝子について

ここでは、一つの形質に注目して、形質が子や孫にどのように伝わっていくかについて考察させ、伝わり方に規則性があることを見出させる。分離の法則を扱うが、染色体に関する図やモデルを活用した実験などを行い、その結果を分析して解釈することなどを通して、規則性を発見させ、その仕組みを推論させることが考えられる。また、無性生殖では親と子の形質は同一であるのに対し、有性生殖ではこの形質は両親と同じとは限らないということに気付かせることも大切である。

また、生物は親から遺伝子を受け継ぎ、遺伝子は世代を超えて伝えられることを扱うが、遺伝子は不変ではなく変化することにも触れ、「(3)エ(ア)生物の変遷と進化」で学習したことと矛盾しないことを理解させることが大切である。さらに遺伝子の本体が DNA という物質であることにも触れる。

なお、現在、遺伝子や DNA に関する研究が進められており、食糧、環境、医療、産業など日常生活や社会にかかわる様々な分野で、その研究成果が利用されるようになってきている。このことについて、文献やコンピュータ、情報通信ネットワークなどを活用して、理解を深めさせることが

考えられる。

平成 20 年 9 月の中学校学習指導要領解説・理科編では、「改善の基本方針」の中で、「…、目的意識をもった観察・実験を行うことにより、科学的に調べる能力や態度を育てるとともに、科学的な認識の定着を図り、科学的な見方や考え方を養うことができるよう改善を図る。」とある。「遺伝の規則性と遺伝子」の単元でも、教育効果を上げるため、観察・実験を実施する必要があると考えられる。

一方で、福岡県採択の中学校理科教科書²⁾を見ると、マツバボタンなどの形質の遺伝に関する観察・実験はある。赤い花の純系のマツバボタンと、白い花の純系のマツバボタンを交雑した子 (F_1) では、全て赤い花になり、孫 (F_2) では赤い花と白い花の形質が子葉の色で判断できることから、分離の法則に従って親の特徴が伝わっていることを確認する観察・実験である。しかしマツバボタンは実際の交雑・交配実験を行うとなると、一年以上の時間を要する。一年生で親の交雑、二年生で子 (F_1) の交配、三年生では孫 (F_2) の形質の確認と三年間で実施する方法もあるかもしれないが、長期に渡りすぎて生徒の関心が持続せず、実際的ではない。このように、中学校理科「遺伝の規則性と遺伝子」の単元では、実際に生徒が交雑・交配実験を通じて親の形質が子に伝わる規則性の理解に至ることができるような、適切な生物教材が見当たらないのが現状である。

そのような中、日本では比較的新しい生物教材である Fast Plants (図 1, 表 1) が、メンデル遺伝の観察・実験に使える可能性が提唱されている³⁾。そこで本研究では、ライフサイクルが比較的短く、栽培が簡易で、室内の人口照明でも栽培できる Fast Plants⁴⁾ に注目し、中学校理科の授業で、理科教師の支援を通じた生徒による実践を視野に、Fast Plants の対立形質の交雑・交配実験のモデルを構築するとともに、実践における課題を見出し、遺伝教材としての改善および活用法を提案することを目的とした。

学習指導要領理科編で求められている内容の一つに、「遺伝子に変化が起きて形質が変化することがあること」を観察・実験を通じて理解できる

ようにすることがある¹⁾。メンデル遺伝の確立に使われたエンドウマメの対立形質の一つ、丸としわの種子は、デンプン分枝遺伝子 (*SBEI*) の正常な型 (丸い種子の形質) と、転移因子が正常な型の遺伝子に入り込んだために分断された型 (突然変異型、しわの種子の形質) と関連したポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 産物の同定、遺伝子型の決定ができる⁵⁾。しかしエンドウマメは、春頃から年に一回しか栽培出来ず、遺伝の伝わり方を学校で学ぶ生物教材としては実際的ではない。

PCR 反応では、サーマルサイクラーのように高価な実験装置がなくても、手作業による温度変化サイクルで産物を得られる⁶⁾ ことから、薬品さえあれば PCR による遺伝子型の区別は、中学校でも可能な観察・実験である。Fast Plants でも交雑・交配実験での表現型と関連した遺伝子型を決定できるモデル遺伝子を検討することができれば、遺伝子のはたらきと表現型との関係を関連づけることが可能となるものと考えられる。そこで、Fast Plants の変異遺伝子で活用できるものがないか、研究論文を検索した (National Center for Biotechnology Information ウェブサイト)。しかし、Fast Plants をキーワードとしたが、遺伝子の視覚化に使えるものは見いだされなかった。Fast Plants ではエンドウマメのような簡易な遺伝子の区別の利用は未だ確立されていない。

遺伝子型 *dwfl/dwfl* の Fast Plants を基本として、その株化されているもののうち、いくつかの変異体が知られている⁷⁾。学校での利用可能な Fast Plants の変異体には、Purple Stem, Rosette, Yellow-green がある⁷⁾。本研究では、一遺伝子雑種として明確な変異として活用できる可能性が考えられる Purple Stem に注目した。そこで、Williams 博士による遺伝学の学習教本「Investigating Mendelian Genetics with Wisconsin Fast Plants」⁸⁾ を、日本の中学校理科教科書に合うように翻訳改変して、教師の利用に資することとした。

Fast Plants 変異のうち Purple Stem は、アントシアニン形成の有無で形質を区別でき、最も判別しやすいと考えられる。発芽後、比較的すぐに形質の違いを判断できる。変異体のうち Rosette は、ある程度成長するまで形質の特徴を区別するのが難しい。Yellow-green は栽培の条件によっては緑か黄緑か形質を判断しづらいものがある。従って、中学校理科で採用しやすいのは、Purple と Non-purple の対立形質であることになる。

Fast Plants の表現型と遺伝子の働きを関係付けるためには、アントシアニン生合成経路の遺伝子 (図 2)、または関与する転写因子遺伝子などで適当なものを探すことが必要である。しかし、日本で唯一の Fast Plants 輸入代理店が、2012 年春の段階で既に東京農工大へ Purple stem 変異遺伝子の研究依頼がなされている (Fast Plants 日本総輸入代理店社長からの私信) ことから、本研究では遺伝子の探究は行わず、中学校での実際的な利用に資するデータを集めることとした。

また本研究では、日本遺伝学会を中心に現在提案されている用語の変更 (表 2)、即ち Dominant 「優性」を「顕性」に、Recessive 「劣性」を「不顕性」に、Haploid 「半数体」を「単数体」、Mutant 「突然変異」を「変異」、Variation 「変異」を「多様性」など、誤解を招きにくい訳語に変更する動き¹⁰⁾ に合わせて、学生 (初等理科、中等理科、環境教育コースの学生計 31 名) を対象に用語変更案への意識調査のためのアンケート調査 (質問紙) を行った。「優性」の代わりに「顕性」を用いること、「劣性」に代わって、「不顕性」を用いること、加えて中国で使われている「隠性」について、意見とともにその理由も調査した。以前にも日本で提案されたことがある「潜性」は、定着しなかったこともあり、本研究では取り扱わなかった。本研究では、優性が「優れている」、劣性が「劣っている」という印象を回避するため、また、中学校理科教科書では「優性」と「劣性」が用語として既に取り扱われているが、社会問題になっている学校での「いじめ」につながらないように配慮する立場からも、「優性」を「顕性」、「劣性」を「不顕性」として表現した。優性の法則は「顕性の法則」とした。

本研究では、中学校理科での「遺伝子のはたらき」の考察へつながる観察・実験の基盤を築くため、Fast Plants の実際の交雑・交配実験によって得た F₂ における分離比の観察・実験を行っている。Fast Plants 純系の「顕性」親として P₁ (Purple stem) を、純系の「不顕性」親として P₂ (Non-Purple stem) を採りあげ、これらの間での交雑を行った (図 3)。一般的に、P₁、P₂ などのように数字部分は下付きでアルファベットに添えて表されるが、本研究では中学生への分かりやすさ・見やすさを配慮し、以降、下付きにはしない。F₁、F₂ も同様である。本研究では受粉は、P₁ から P₂ へとともに、P₂ から P₁ へも行った。得られた F₁ (子) 同志の交配、得られた F₂ (孫) での形質の確認をするとともに、教材として販売

されている F2 での形質の確認も行い、実際に親から交雑を開始した場合の F2 での形質の分離比と比較した。また、顕性ホモ接合体、顕性/不顕性ヘテロ接合体、不顕性ホモ接合体をさらに分離し、1:2:1の比を導き出せるか可能性を検討し、アントシアニンの紫色の濃さと遺伝子の働きを結びつける活動へつなげる構成を試みた。その結果に基づいて、中学校理科教師を目指す学生にアンケート（質問紙）を取り、本研究での Fast Plants を用いた遺伝の規則性と遺伝子の観察・実験の授業への効果に対する考え方を検証した。

2. 研究方法

日本遺伝学会が提案している「顕性」「不顕性」に対する大学生の意識調査

次のような質問紙で「遺伝学用語に関するアンケート」調査を、本学の初等教育教員養成課程理科選修の2年生23名と3年生1名、中等教育教員養成課程理科専攻の3年生4名、環境教育コースの3年生3名の計31名の学生に対して行った。次にアンケート調査の内容を示す。

メンデル遺伝の法則のうち、優性の法則において、「優性」、「劣性」と日本語訳されている用語があります。「優性」は優れている、「劣性」は劣っているとの解釈になりがちなため、平成22年9月から日本遺伝学会を中心に最重要語句（10語）の中で、「優性」は「顕性（表に顕れる性質）」、「劣性」は「不顕性（表に顕れない性質）」に変えていくことが提唱されています（日本遺伝学会HP, <http://genetics.ibio.jp>）。ちなみに中国では「顕性」は既に使われていて、「不顕性」にあたる用語は「隠性」とされています。

英語名	日本語訳	提唱されている日本語訳
Dominant	優性	顕性
Recessive	劣性	不顕性

日本語訳を変えることについて、貴方はどのように考えますか？いずれか番号にマルをお願いします。また、その番号を選んだ理由を自由に記述して下さい。

- 1 これまで通り、「優性」「劣性」で良い
- 2 「劣性」だけ変えれば良い（「不顕性」又はその他へ）
- 3 「優性」のみ変えれば良い（「顕性」又はその他へ）
- 4 「優性」「劣性」とも変えた方が良い（「顕性」「不顕性」以外へ）

5 「優性」の代わりに「顕性」、「劣性」の代わりに「不顕性」が良い

6 「優性」の代わりは「顕性」が良いが、「劣性」の代わりは「不顕性」ではなく、中国のように「隠性」が良い

7 その他（ ）
理由：

メンデル遺伝の観察・実験プロトコル

Paul Williams 博士によるプロトコルの日本語訳を行った。図版などは、できるだけ原本を利用した。二遺伝子雑種の観察・実験は、学習指導要領に記載がないことから省略した。ただし、カイ二乗検定は実施し、明瞭に3:1の分離比にならなかった場合に、観察・実験で得られた結果が3:1の分離比と見做せるか、検証できるように配慮した。中学校理科の授業では、メンデルは3:1の比を出すのに一万個もの形質を比較していることにも触れ、一万個は数えられないが、数百個でも検証できる方法の一つとして紹介した。学生には Fast Plants の栽培法も渡した。

大学授業での Fast Plants を使った交雑・交配実験

栽培土は、中学校での利用も考えて、Williams 博士の教本でも紹介している「バーミキュライト」を用いた。土を用いた場合には、用いる土によって肥料条件が一定しないが、バーミキュライトを用いると肥料条件を一定にし、液肥や遅効肥料を用いることで目的別の栽培ができるからである。また、黒ポリポット（口径6cm、以下同じ）に入れたまま、バーミキュライトは再利用が可能である。ポリポットの底穴には、水切りネットを小さく切ったものを敷き、その上からバーミキュライトをポリポットに入れた。種子を置く前に、バーミキュライトを水道水で湿らせた。ポリポットは複数個をまとめてプラスチックのトレイに入れるか、500mlのペットボトルの下端を8cmくらいの高さで切ってカップにしたものにポリポットを入れ、水は底面給水できるようにした。このペットボトルカップは、使い捨てのクリアカップなどでも良い。その場合は固めのカップを選んだ方が水漏れの危険が少なくなる。水やりを底面給水にすることで、給水の管理が少なくて済むことから教師の負担が軽くなることが期待される。光源は、複数個のポリポットがトレイに並んでいる場合には蛍光灯をつるしたメタルラックで照射した。一個か二個のポリポットの場合には、デスク

スタンドでも照射可能である。いずれも植物体から10cmほどの高さから24時間照射した。温度は春から秋にかけては部屋の温度で充分成長する。冬は暖房が効いた部屋で栽培する方が良い。

発芽させる Fast Plants の種は、P1 と P2 では、それぞれ別のポットあたり3個を水で湿らせた栽培土の上に置き、発芽を待った。48時間で発芽しなかった種子は除去した。また発芽したもののうちで最も成長の勢いや杯軸の太さがあるものを、ポリポットあたり1株のみ残した。成長に従って、自立できなくなる Fast Plants は、竹くしを立ててヒモでゆるく固定した。肥料は液肥(ハイポネックス2,000倍うすめ液)に加え、遅効肥料も栽培土に予め混ぜていると花の数も多く、葉は大きくなり葉の枚数も多くなるが、遅効肥料も加えると教師の負担が増すことになるので、本研究では液肥のみとした。液肥だけでも、花の数は水だけよりも多くなる。

Fast Plants は基本的に他家受粉で結実する。P1 どうし、P2 どうしでも植物体さえ違えば結実してしまう。そこで学生一人あたりP1をひとポリポット、P2もひとポリポットを自宅に持ち帰らせることで物理的に隔離した状態で、P1とP2のみの間で交雑が起こるようにした。中学校での実施の場合にも同様にして生徒にP1とP2をひとポリポットずつ持ちかえらせて栽培・受粉させることができると考えられる。交雑のさせ方は、学生に配布した日本語訳マニュアルや栽培方法のプロトコルを参照させ、授業で実際に演示して自宅で受粉できるように配慮した。日本語訳マニュアルでは乾燥ミツバチを串にさして、開いている花の雄しべの花粉をくっつけ、他の植物体の花に受粉する方法が採られている。しかし日本では乾燥ミツバチは手に入りにくいと考えられるので、雄しべをピンセットではさみ取り、他の植物体の雌しべに直接受粉させる方法も紹介し、綿棒が使えることは配布したマニュアルで示すとともに、口頭でも伝えた。この受粉作業は、平成20年度改定学習指導要領では小学校理科5年生で行うものであることを学生には告知してあり、小学生にもできる作業であることも確認されている(西野・京田, 2009)。花粉を見やすくするために黒綿棒に花粉をつけ、雌しべに受粉させる方法が良いが、雌しべが雄しべより低いと綿棒では受粉が難しいこともあり、ピンセットで雄しべを取って受粉する方法もある。植物体あたり10粒の種子を確実に取ることを目的に、植物体あたり2~3個のさやが熟す見込みになったら受粉作業を止め、受粉

開始後20日をめどに給水も停止して植物体を乾燥させた。

F1の種子は、さやごとに植物体の記号もつけて、チャック付ポリ袋に回収した。記号は、学生のイニシャル+交雑の方向を示す記号+ポット記号+さや番号である。例えば、「JHP1F1a01」なら、イニシャル JH の学生で、交雑は P1 の雌しべへ P2 の花粉を受粉した場合の F1 で、ポットは a で、最後の 1 は、その一つ目のさやを意味する。こうすることで、F1 の栽培中におこる変化も、その元のさやや植物体へたどり着くことができ、考察の資料となることが期待される。チャック付ポリ袋は、針で小さな穴を一か所開け、発芽率を落とさないために冷蔵保存した。

F1のうちいくつかで、次の栽培・交配を行った。F2の種子は、形質の3:1という分離比に近い値を得るため、500個~1000個は必要である。植物体あたり10~20個の種子をつけるものとする、50から100個のポリポットで栽培が必要である。F1同志は、遺伝子型は全てヘテロ接合体で同じであることから、一つのトレイにポリポットを集めて、まとめて蛍光灯照明で栽培し、他家受粉の作業を行った。植物体あたり、2~3個以上のさやが熟成しそうであれば給水を止め、乾燥させた。花がついても取り除くことで種子の取得を早めた。実際の交雑・交配実験で得られた F2 での形質の分離と、販売されている F2 種子での形質の分離との比較を行った。実際の交雑・交配実験によって得られた F2 の種子は、さやで区別した。すなわち、「JHP1F1a01F2b」とあれば、栽培者はイニシャル JH で、P1 に P2 の花粉を受粉して結実した F1 で a のポリポットの1個目のさや由来で、他の F1 の花粉で受粉して結実した F2 で、さやは b に由来する。

発芽は、シャーレにろ紙を敷き、水道水を吸水させて F2 の種子を置き、フタをして水道水を下2cmほど入れた容器に斜めにして置いた。人工照明を当て、3~4日間ほど発芽の様子を観察し、形質の違いを記録した。

販売種子の例は、教員研修(平成22年度教員研修及び平成24年度教員免許状更新講習)での結果を利用した。両データとも、日本語訳マニュアルにあるカイ二乗検定表を用いて、どの程度3:1の分離比と言えるか検討・比較した。その際、一遺伝子に着目していることから、自由度は1となり、カイ二乗の値がやや高めに算出されるため、本来は補正が必要である。しかし、ここでは Williams 博士の原本に倣って、通常の簡単

なカイ二乗検定で分離の法則が成り立つと言えるか、検証している。

中学校理科「遺伝の規則性と遺伝子」におけるFast Plants 交雑・交配実験の効果に関するアンケート調査

中学校理科「遺伝の規則性と遺伝子」でのFast Plants 交雑・交配実験の効果に関するアンケート調査（質問紙・記述回答）を、初等理科選修・中等理科専攻・環境教育コースの学生8名に対して行った。アンケート調査紙の前文は、次のようなものである。

メンデルの「分離の法則」を導くために、親（P1とP2）の交雑、子（F1）の交配実験を経て孫（F2）の形質を確認する観察・実験を実施しました。実際に中学校理科の授業（1学期、春から夏に実施するので、親のFast Plantsを大学授業と同じように生徒が家に持って帰っても、Fast Plantsはすくすく育つと考えられます）で実施することを想定した場合、どのような利点が考えられますか？利点とそう考える理由を挙げて下さい。また、どのような不都合（又は欠点）が考えられますか？不都合（又は欠点）な点とそう考える理由を挙げて下さい。それぞれ、複数挙げていただいても構いません。

記述回答は、そのまま結果へ記録し、考察を行った。以上の観察・実験結果などを基に、中学校理科でのFast Plantsを用いた交雑・交配による形質の分離、「分離の法則」の観察・実験の在り方を提案した。

3. 結果と考察

日本遺伝学会の提案する「顕性」「不顕性」に対する意識アンケート調査

アンケート結果（初等理科学生23名、中等理科+環境教育8名、計31名）（図4）：

- 1 これまで通り、「優性」「劣性」が良い
..... 13名
- 2 「劣性」だけ変えれば良い（「不顕性」又はその他へ） 0名
- 3 「優性」のみ変えれば良い（「顕性」又はその他へ） 0名
- 4 「優性」「劣性」とも変えた方が良い（「顕性」「不顕性」以外へ） 1名
- 5 「優性」の代わりに「顕性」、「劣性」の代わりに「不顕性」が良い 10名
- 6 「優性」の代わりは「顕性」が良いが、「劣性」

の代わりは「不顕性」ではなく、中国のように「隠性」が良い 6名
7 その他 0名

4, 5, 6合わせると17名（55%）で、1の「これまで通り」の13名（42%）より多くはなっている。変更案に概ね賛成の意見では、変更の理由に同意する内容であった。一方、現行のままを支持する意見では、変更の理由よりも学習しやすさやこれまで使われてきた経緯を大事にしていた。「不顕性」の「不」という否定の接頭辞への抵抗感も現れていた。「顕」という漢字の馴染みのなさも問題があると考えられる。記述では、日本遺伝学会の提案に否定的な意見は13件、肯定的な意見は11件、「不顕性」を使うことのみ否定的な意見は6件であった。このことから、「優性」「劣性」を必ずしも優れている、劣っているとの認識ではないこと、「不」を使うことへの抵抗感もどうかかわれ、「顕」という漢字への馴染みも鑑みて用語の変更を検討する必要があると考えられる。

Fast Plants 交雑・交配による観察・実験 P1とP2の交雑実験

1日目：底面給水および上からの水やりで、栽培土であるパーミキュライトに充分水を吸わせた。そこにP1, P2それぞれ別のポットに3粒づつ種子を置いて発芽させた。

2日目以降：24時間以内でほとんどの種子が発芽し、最も発芽の勢いがあるFast Plantsを1株残して他は間引いた。P1とP2のポットをそれぞれ一つ、学生の自宅へ持ち帰らせた。Fast Plantsは基本的に他家受粉で種子を結実するので、同じ純系どうしで受粉しないよう隔離するための措置である。黒綿棒で花粉を採取し（図5）、めしべへ受粉させた。光はデスクスタンドなどの光を植物体から10cmほどから24時間照射させた。植物体あたり2～3本のさやができた段階でFast Plantsを大学へ戻してもらい、給水を止め、あとからできる花芽は取り去り、種子の熟成を促進させた。このようにして中学生による観察・実験でも、同じように行うことが可能と考えられる。本研究での栽培は冬であったので、春季にくらべて成長が遅れ気味ではあったが、2か月以内で、F1の種子を得ることができた。

F1 どうしの交配実験

F1 種子は、14本のさやから計91個回収できた。さやあたり最高15個入っているものもあっ

たが、1個のみのさやもあった。種子はさや別にポット記号、交配の方向を記録し、専用のチャック付ポリ袋に保存した。91個の種子のうち49個を発芽処理に用いた。各さやから半数の種子をランダムに取りだし、水で湿らせたろ紙上で吸水させた。その結果、発芽率は、24時間で34個(69%)、48時間で43個(88%)、72時間で46個(94%)であった。残りの3個は発芽することはなかった。また、発芽が遅れたFast Plantsはその後の成長も思わしくないことから、少なくとも48時間以内で発芽したFast Plantsを育てる方が中学生にとってやりがいにつながると考えられる。

F2の形質確認実験

F2の種子は、黒ポリポットは用いず、シャーレで発芽させて形質の違いを確認した。その結果、紫と緑では、カイニ乗検定でも有意に3:1に分離していると言えた(表3)。販売されているF2種子での分離比と比較しても有意な差は見いだされなかった(表4)。また、濃い紫:薄い紫:緑もほぼ1:2:1に分離しており、遺伝子のはたらきが各々、2:1:0であることを中学生に予想させることを導ける実験結果となった(表5、図6、図7、図8)。

ここまでの観察・実験で、3か月半ほど日数がかかっている。P1とP2の交雑によるF1の種子取得までに9週間ほどと、少々時間がかかった感がある。F1どうしの交配によるF2の取得は教師主導で行えるが、大学生でもこの交雑によるF1取得までに時間がかかっていることから、教師の指導をF1取得の段階に集中して遅れを防げば、5月~7月、また9月~11月でも実施は可能であろうと考えられる。

今回は冬季に実施したが、中学校理科では一学期、夏休み前に配当される単元であることから、栽培も容易であると共に、生徒一人ひとりがF1種子を得るために自宅で交配実験をできることが授業への意識を高めることに繋がるのが学生へのアンケートから推察された(表6、図9)。親の純系どうしの交配が起こらないように、確実にP1とP2の間での交雑のみが起こるように、各々1株ずつ学生に栽培させ、自宅で開花を迎え、交雑させた。この段階での交雑さえクリアできれば、あとのF1同志の交配は学校で行っても問題はないと考えられる。P1とP2の交雑からF1を得るのに2か月ほど(10月末~12月下旬)、F1同志の交配からF2を得るのに1か月ほど、F2の形質を確認するのに1週間ほどと、期間は3か

月と少しで充分に実施できる内容であることが期待される。次々に花が咲く場合は、交雑・交配をいつまでも続けていると種子を得るまで時間がかかってしまう。そこで今回は、ファストプランツあたり3~5個のさやを作らせることができれば、それ以上の交雑・交配は行わず、さやが充分成長したら給水を止めて枯れさせた。さやを早く大きくさせるため、花がついても摘み取った。さやあたり、最大15個、最少1個の種子が得られた。

F1の栽培は大学でまとめて行った。F1は、さや単位で管理できるよう、すべてさや番号を付け、さやごとにチャック付ポリ袋に種子を回収した。F1種子91個のうち、49個を水で湿らせたろ紙の上において発芽を促進させた。その結果、24時間で69%、48時間で88%の種子が発芽した。この結果は、市販されているFast Plantsの発芽率に匹敵することから、F1種子を得る操作は適切であったと考えられる。F1種子91個のうち、発芽させなかった42個はチャック付ポリ袋(穿孔付)にさやごとに分けて入れ、後の再実験に供せるよう冷蔵保存した。

本研究では、P1とP2はほぼ同数栽培したが、学生による受粉でもP2F1、即ちP2(Non-purple)へP1(Purple)の花粉を受粉したF1種子の数が少なかった。また、紫色を確認できないP2F1も4株あり、この4株を隔離し、それら間で交配を行ったが、さやが少し伸びた時点で全体にしなびて枯れてしまった。P2の自家受粉によるF1かもしれない、そのため稔性が弱かった可能性もあり、Fast Plantsの他家受粉性に関する詳細な再検討が必要かもしれない。

Fast Plantsを用いた分離の法則の観察・実験とともに、メダカでの交配実験でF1では顕性の形質のみが観察される活動を組み入れることで、F2ではどのように形質が現れるのか、Fast PlantsでのF2での形質の分離結果を基に、それまでの知識を転移させ、予想を立てる活動へ結びつけることも可能である(西野・前田, 2011)。エンドウ豆の丸としわの対立形質を示すデンプン分枝遺伝子のように、その存在やその働きを明瞭に見出せる遺伝子をFast Plantsで見出すことによって、中学校理科の指導要領にある遺伝子の本体や突然変異に関しても有効な生物教材となることも期待されることから、対立遺伝子構造の解明が待たれる。

4. まとめ

平成20年3月改訂の中学校理科学習指導要領解説では、「遺伝の規則性と遺伝子」においては、「交配実験の結果などに基づいて、親の形質が子に伝わる時の規則性を見いだすこと」、内容の取扱いでは「分離の法則を扱うこと。また、遺伝子に変化が起きて形質が変化することがあることや遺伝子の本体がDNAであることにも触れること。」とされている。「一つの形質に注目して、形質が子や孫にどのように伝わっていくかについて考察させ、伝わり方に規則性があることを見出させる。」ともある。「分離の法則を扱う」際には、授業に観察・実験を導入することが期待されていると言える。しかし、福岡県内採択の教科書で扱われているのは、マツバボタンなど栽培に数年の単位で時間がかかるものなどで、生徒が主体的に行う観察・実験に適切な教材が取り上げられているとは言い難い現状がある。そこでライフサイクルが7週間ほどで、花が咲くまで播種から2週間ほどと日数がかからず、P, F1, F2の種子を一度に播種できるとともに、数多くのF2の形質を一度に確認できて分離の法則を導きやすいと考えられるFast Plantsに注目し、メンデル遺伝学を学ぶ教材として取り上げた。その際、中学校理科教師の指導用解説書とするため、Fast Plantsの開発者でもあるウイスコンシン大学のPaul Williams教授による英文テキストを、試みに日本の中学校の実情に合うように翻訳・改訂し、中学校理科教師を目指す学生に教師の立場で内容を説明後、学生実験で実践し、アンケート調査によってその有効性を検証した。その際、Dominant「優性」を「顕性」と表現するなど、差別的な印象をなくすため、日本遺伝学会からも提言されている、新しい遺伝学用語訳を採用し、そのことへの意見も集約した。その結果、期待値と実測値との差を評価するカイ二乗検定も含めた内容で、概ね中学校理科授業で使える教材であることが確認された。その際には日本遺伝学会で提言されている新しい遺伝学用語訳を用いることが、より良い遺伝の規則性の理解へつながることへの期待がアンケート結果から考えられた。

なお、本論文の図は本来カラーで示すべきだが、白黒で示されている。カラー版はファストプランツホームページ⁹⁾の最新情報にカラーで掲載されているので参考にされたい。

5. 引用・参考文献

- 1) 文部科学省：中学校学習指導要領解説 理科編 平成20年3月, 2008
- 2) 有馬朗人, 他57名：理科の世界 3年, p93, 大日本図書, 2012
- 3) 西野秀昭・前田紗綾香：Fast Plantsとメダカの遺伝教材としてのコラボレーション効果に関する研究—「遺伝の規則性と遺伝子」単元での「分離の法則」の授業実践及び教員研修—, 科学教育研究, Vol.35 No.1, 4-15, 2011
- 4) 佐藤茂・石澤公明・吉岡俊人訳：Fast Plantsで学ぶ植物の世界, 教育用モデル植物Fast Plants 日本語版, In the woods. Books, 2006
- 5) The wrinkled-seed character of pea described by Mendel is caused by a transposon-like insertion in a gene encoding starch-branching enzyme: Bhattacharyya, M.K., Smith, A.M., Ellis, T.H., Hedley, C., & Martin, C. Cell, 60(1), 115-122, 1990 Jan.
- 6) 例えば, 数件出版 HP pdf: 特集2 実践報告「人力サーマルサイクラー ～手動式PCR法でDNAを増やそう～」実感をもってしくみを理解する高等学校ならではのバイオ実習, 兵庫県立須磨東高等学校 薄井芳奈 (<http://www.chart.co.jp/subject/rika/scnet/46/Snet46-2.pdf>)[#]
- 7) ファストプランツ日本語 HP (<http://www.fastplants.jp/index.php>)[#]
- 8) Paul Williams: Investigating Mendelian Genetics with Wisconsin Fast Plants (<http://www.fastplants.org/pdf/activities/WFPgenetics-06web.pdf>)[#]
- 9) ファストプランツ最新情報 (<http://www.fastplants.jp/>)[#]
- 10) 日本遺伝学会 HP (<http://gsj3.jp/>)[#]
: HPは全て、2013年9月27日最終アクセス済み。

本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）（基盤研究（C）課題番号24501104）の交付を受けて行った成果である。



図1 Fast Plants, *Brassica rapa*

花は、花弁が黄色の離弁花4、雌しべ1、雄しべ6（長4短2）、がく4から構成される。

表1 ファストプランツの特徴

項目	特徴
学名	<i>Brassica rapa</i>
科	アブラナ科 (<i>Brassicaceae</i>)
起源	成長の速い Petite ミュータントから選抜
遺伝子型	dwfl/dwfl
形態	わい性
染色体数	10本
ライフサイクル	35日～40日
開花	播種から開花までに要する日数 14日～25日
草丈	平均51mm（播種後14日目）
葉数	平均6.4枚（播種後14日目）
色調	植物体は濃緑色で強健，花は黄色，種皮は茶色

引用は、佐藤・石澤・吉岡, 1997; Fast Plants HP から行った。

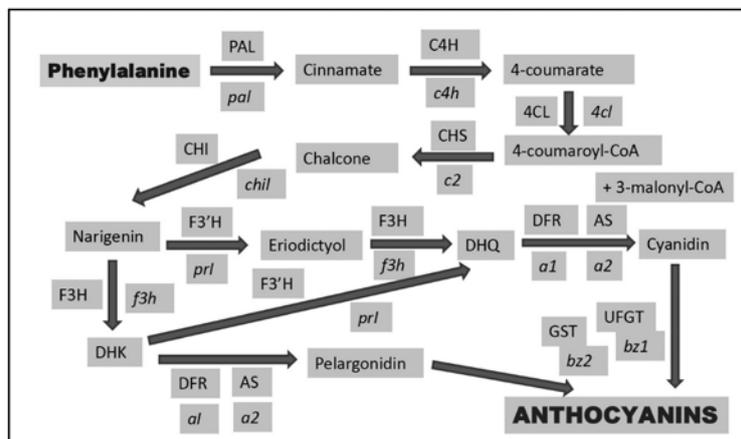


図2 フェニルアラニンからのアントシアニン生合成経路

イタリックの小文字アルファベットは遺伝子名を、大文字表記はその遺伝子にコードされた酵素タンパク質を示す。詳細は、引用文献参照。(引用文献: Mandeep Sharma, et al., Identification of the *Pr1* Gene Product Completes the Anthocyanin Biosynthesis Pathway of Maize, Genetics 188, 69-79, 2011)



図3 Fast Plants の Purple Stem と Non-purple Stem

右が Purple Stem, 左が Non-purple Stem。発芽後 1 週間ほど。通常, 発芽後 24 時間 ~ 48 時間のシュートの色で, Purple か Non-purple か判断できる。

表2 日本遺伝学会によって提案されている遺伝学用語最重要語句 (10 語)

最重要語句(10語)			
語句、フレーズ	元の訳語(遺伝学用語集)	変更案	理由等
<u>dominant</u>	優性	顕性	劣性という語感の悪影響が大きいため、訳語を変更すべき。優性・劣性という言葉の変更は、たいへん影響が大きいため、本学会のみで決めるのではなく、日本人類遺伝学会をはじめ、周辺の関連学会とも相談し賛同を得るのが良いのではないかと。
<u>recessive</u>	劣性	不顕性	劣性という語感の悪影響が大きいため、訳語を変更すべき。
<u>heredity</u>	遺伝	遺伝	遺伝に継承の意味が含まれているので、継承は必要ないのでは？
<u>inheritance</u>	遺伝	遺伝	遺伝に継承の意味が含まれているので、継承は必要ないのでは？
<u>allele</u>	対立遺伝子	アレル	対立遺伝子座という訳語が誤解を招くため、問題となっている。他のalleleを含む語も同様。
<u>mutation</u>	突然変異	[突然]変異	現代では、「変異」という言葉はmutationの意味で通用していると思われる。「突然」という語感の悪影響も懸念される。例えば、プロセスの結果としての配列である「突然変異」が子孫に受け継がれることが、「突然」という言葉との違和感につながる。Mutationにはもともと「突然」の意味はない。
<u>variation</u>	変異	(1)変動 (2)多様性	変異という訳語はmutationを指すものとした。variationはプロセス、プロセスの結果としての状態両方をさす場合があるため、変更案のようにするのはどうか。
<u>diversity</u>	多様性	(1)分岐 (2)多様性	プロセスとしての「分岐」を入れた。
<u>genotype</u>	遺伝子型	遺伝子型あるいは遺伝型、あるいは他の語	genotypeは、任意のlocusあるいは遺伝マーカーに適用できるため、「遺伝子」と限定するのは意味上はおかしい。「遺伝型」とすると、遺伝的バックグラウンドのような、複数genotypeの組み合わせのようなイメージがある。(allelotypeがgenotypeのような意味で使われるか、検証が必要)
<u>haploid</u>	単数体	単数体	元の訳語「単数体」に対して、「単数体」の変更案があった。monoploid(1倍体)とhaploidの違いをどのように示すべきか。「6倍体植物のhaploidは3倍体」の意味がわかるように。haplo-は「単一」の意、「半分」の意味ではない。単数体の2倍が2倍体では変だ(0.5×2=2?)。

日本遺伝学会 HP (<http://gsj3.jp/>) の遺伝学用語編纂プロジェクトによる案。

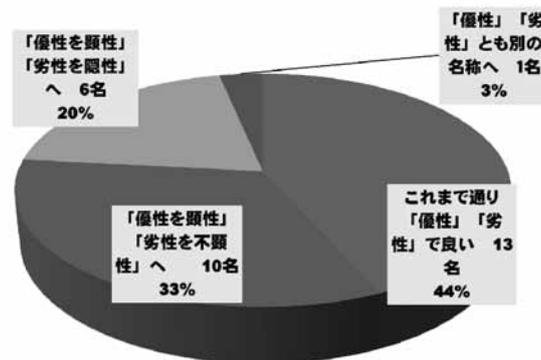


図4 日本遺伝学会の提案「優性を顕性へ」「劣性を不顕性へ」への教師を目指す学生の意見



図5 黒綿棒に花粉をつけると花粉が見やすい

右の黒綿棒の黄色い粒(白く見える小さな点々)がFast Plantsの花粉である。左の普通の綿棒にも花粉がついているが、花粉が分かりにくい。黒綿棒を使うことで、花粉が採取されたことを確認できる。

表3 実際の交雑・交配実験でのF2の形質の分離(紫と緑)

形質	1班	2班	3班	4班	5班	6班	7班	8班	計
紫	36	38	35	40	47	35	31	41	303
緑	15	14	16	12	5	16	20	9	107
分離比	2.4 : 1	2.7 : 1	2. : 1.2	3.3 : 1	9.4 : 1	2.2 : 1	1.6 : 1	4.6 : 1	2.8 : 1

カイ二乗値の合計 = 0.263 有意水準 5% 自由度 1 ではカイ二乗値 = 3.84 なので 3 : 1 と言える。

表4 教員研修におけるファストプランツ F2 の形質分離 (販売種子)

2010年8月19日

形質	1班	2班	3班	4班	5班	6班	総数
紫	35	24	30	38	14	30	171
緑	9	10	6	20	3	11	59
分離比	3.8 : 1	2.4 : 1	5.0 : 1	1.9 : 1	4.7 : 1	2.7 : 1	2.9 : 1

カイ二乗値合計 = 0.0521 有意水準 5% 自由度 1 ではカイ二乗値 = 3.84 なので 3 : 1 と言える。

2012年8月18日

形質	1班	2班	3班	4班	5班	6班	総数
紫	50	50	60	41	72	48	321
緑	9	23	25	14	16	16	115
分離比	5.6 : 1	2.2 : 1	2.4 : 1	2.9 : 1	4.5 : 1	3 : 1	2.8 : 1

カイ二乗値の合計 = 0.440 有意水準 5% 自由度 1 ではカイ二乗値 = 3.84 なので 3 : 1 と言える。

表 5 実際の交雑・交配実験での F2 での形質の分離 (濃い紫と薄い紫と緑)

形質	1 班	2 班	3 班	4 班	5 班	6 班	7 班	8 班	計
濃い紫	18	10	13	14	19	11	12	12	109
薄い紫	18	28	22	26	28	24	19	29	194
緑	15	14	16	12	5	16	20	9	107
分離	1.2 :	0.7 :	0.8 :	1.2 :	3.8 :	0.7 :	0.6 :	1.3 :	1.0 :
比	1.2 :	2.0 :	1.4 :	2.2 :	5.6 :	1.5 :	1.0 :	3.2 :	1.8 :
比	1	1	1	1	1	1	1	1	1

カイ二乗値の合計 = 1.20 有意水準 5% 自由度 2 ではカイ二乗値 = 5.99 なので 1 : 2 : 1 と言える。



図 6 F2 における紫と緑の分離

カラー版はファストプランツ HP 最新情報を参照。



図 7 F2 における濃い紫と薄い紫と緑の比較

濃い紫丸 (右) が濃い紫色, 薄い紫丸 (左上) が薄い紫色, 緑丸 (左下) が緑色の形質を示している。
カラー版はファストプランツ HP 最新情報を参照。

表6 「遺伝の規則性と遺伝子」単元へのFast Plants 導入効果に関するアンケート調査結果

利点	欠点
<ul style="list-style-type: none"> ◎植物を自ら育てる、視聴覚教材にはない実感の効果、責任感、生命倫理感 ◎色での形質の違いが分かりやすい ◎実際に個体数を増やすことで分離の法則が導ける実感は大きい ◎教師による説明だけではない、生徒理解が深まる ◎生徒が授業へ積極的に参加できる ◎世代交代が早くて水の管理が簡易なため、スムーズに実験を行える、etc... 	<ul style="list-style-type: none"> ×ピーターコーンでもできる (注：一個体中でのモザイク模様と生徒に取られがちなため、現在は×) ×自宅へ持ち帰り中の落下、自宅で栽培しない、学校へ持ってこない可能性 ×自宅での電気スタンド点けっぱなし ×受粉作業に不慣れ ×カイニ乗検定の計算が難しい ×枯らすとからかいの種になる ×分離の法則通り3：1ちょうどにならない、etc...

カイニ乗値計算シート

形質	実測数	期待数	カイニ乗値
紫	303	307.5	0.0659
緑	107	102.5	0.1976
計	410	410	0.2634

方法

- ①B3に紫のファストプランツの数を入力します。
- ②B4に緑のファストプランツの数を入力します。
- ③自動的にB5に実測数の合計値が表示されます。実測数の合計から紫と緑の期待数が自動的に計算されます。
- ④その結果、紫と緑のカイニ乗値が自動で計算され、その合計値がD5に表示されます。
- ⑤D5のカイニ乗合計値が3.841より小さければ、緑の数が1の場合、紫の数は3と言えます。

詳しくは、「ファストプランツによるメンデル遺伝の探求」12ページから14ページを見てみよう。

カイニ乗値計算シート 入力例

形質	実測数	期待数	カイニ乗値
紫	310	300	0.3333
緑	90	100	1.0000
計	400	400	1.3333

カイニ乗値計算シート 1:2:1

形質	実測数	期待数	カイニ乗値
濃い紫	109	102.5	0.4122
薄い紫	194	205	0.5902
緑	107	102.5	0.1976
計	410	410	1.2000

方法

- ①B3に濃い紫のファストプランツの数を入力します。
- ②B4に薄い紫のファストプランツの数を入力します。
- ③B5に緑のファストプランツの数を入力します。
- ④自動的にB6に実測数の合計値が表示されます。実測数の合計から濃い紫と薄い紫と緑の期待数が自動的に計算されます。
- ⑤D6のカイニ乗合計値が5.991より小さければ、緑の数が1の場合、濃い紫の数は1、薄い紫の数は2と言えます。

詳しくは、「ファストプランツによるメンデル遺伝の探求」12ページから14ページを見てみよう。

カイニ乗値計算シート 1:2:1 入力例

形質	実測数	期待数	カイニ乗値
濃い紫	90	100	1.0000
薄い紫	220	200	2.0000
緑	90	100	1.0000
計	400	400	4.0000

図8 カイニ乗値計算シート

エクセル表で、各形質の実測数を入力するだけで、期待数とカイニ乗値（個別、合計とも）が計算される。入力例は単純な値で、暗算でも計算・検算できる値にしてある。

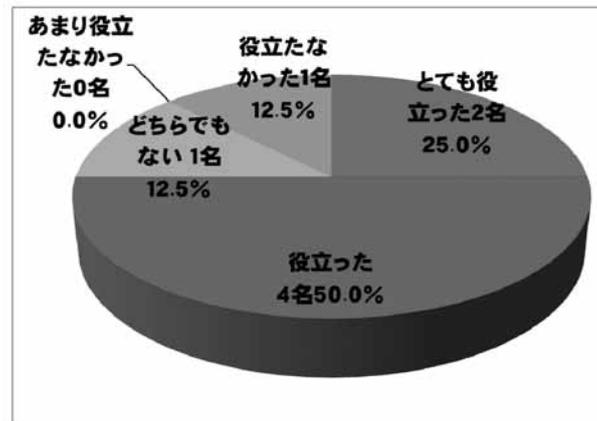


図9 「ファストプランツによるメンデル遺伝の探求（中学校理科「遺伝の規則性と遺伝子」の観察・実験）」は、交雑・交配実験の役に立ちましたか？」との質問への回答