

理科Iの「遺伝」と選択生物の「遺伝子と形質発現」
の指導内容とその関連性について

筑波大学附属駒場中高等学校

貝 沼 喜 兵
石 川 秀 樹

理科 I の「遺伝」と選択生物の「遺伝子と形質発現」の指導内容とその関連性について

貝 沼 喜 兵
石 川 秀 樹

I はじめに

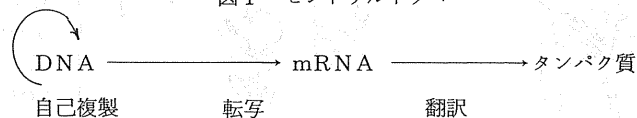
指導要領の改定にともない，昭和57年度から理科 I の指導がはじめられた。その生物領域では，細胞・生殖・遺伝・進化・生態などが基本的な指導項目となっている。

一方，明年からはじまる選択生物の中で，理科 I の遺伝単元に対応しているのは「遺伝子と形質の発現」である。

「遺伝」の指導の中心となるのは，メンデルの法則である。ところで，理科 I の標準単位は 4 単位であるが，指導できる総時間数は 140 時間である。この中で「遺伝」に割りふられる標準時間は，おそらく 5 時間ぐらいであろう。この 5 時間で，メンデルの法則を中心に，「遺伝」の内容をどのように指導展開したらよいのであろうか。

選択生物の「遺伝子と形質の発現」の指導のポイントは，何よりも，「DNA は，遺伝子の本体である」ことを理解させることであろう。そして次に，図 1 で示される，いわゆるセントラルドグマといわれる関係，すなわち，遺伝子がタンパク質（酵素）の合成の支配を通して形質発現を調節している関係を理解させるにある。

図 1 セントラルドグマ



選択生物の標準単位は 4 単位で，理科 I に比較すると時間的には余裕はあるが，内容が高度であり，生徒に理解させるのにかなりの困難性がある。また生徒の理解を促進するため実験を導入したいのだが，設備や費用などから適切な実験例があるかどうかなどが問題となる。

はじめに，2つの単元の指導のポイントと現状で気になる問題点を指摘してみた。一体それぞれの現場で，この2つの単元をどのように指導しようとしているのだろうか，筆者は，このことに大変興味をもっている。筆者は，これらの指導とその相互関連には，次の章で明らかにするよ

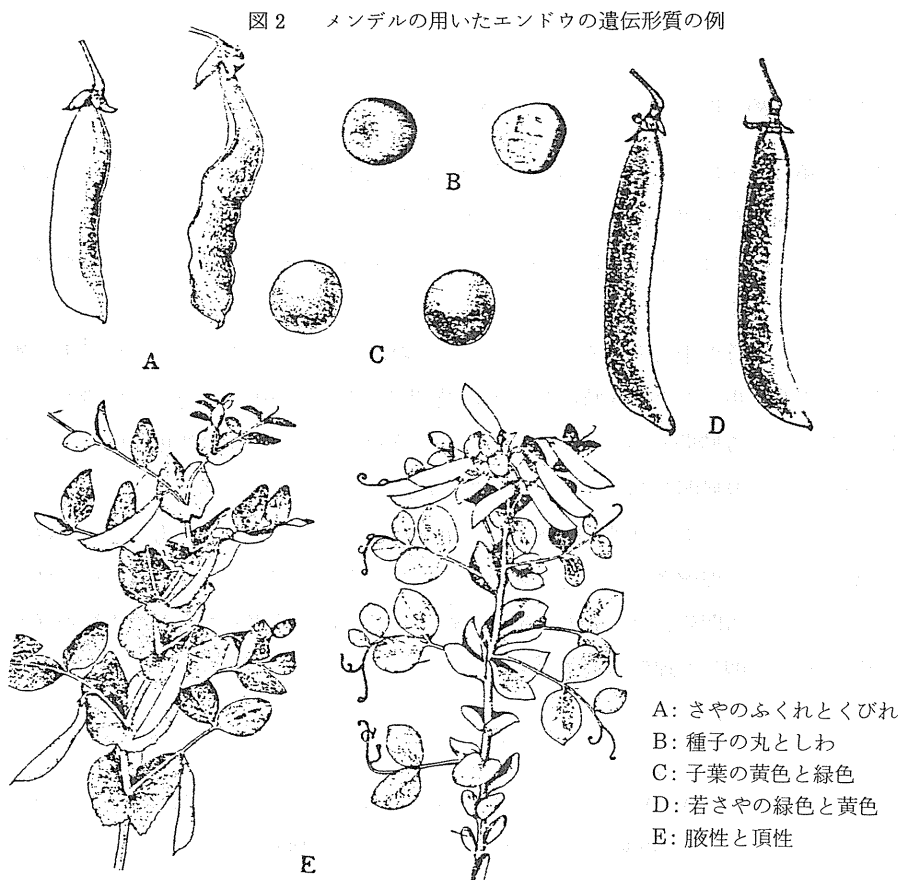
うに4つのパターン（展開例）を予測している。そこで、それぞれの現場で立てられている指導計画と対比して、筆者の4つの展開例の問題点に率直なご批判を頂きたい。

II 4つの展開例

展開例 1

(1) メンデルの法則

① 1865年, Gregor Johann Mendel (1822~1884) は, エンドウを用いた交雑実験の結果をまとめ, 「植物雑種に関する研究」として発表した。図2にメンデルの用いたエンドウの対立形質の例を示した。



② この研究は後世メンデルの法則といわれ, 優性の法則, 分離の法則, および独立の法則の3つの法則からなっている。

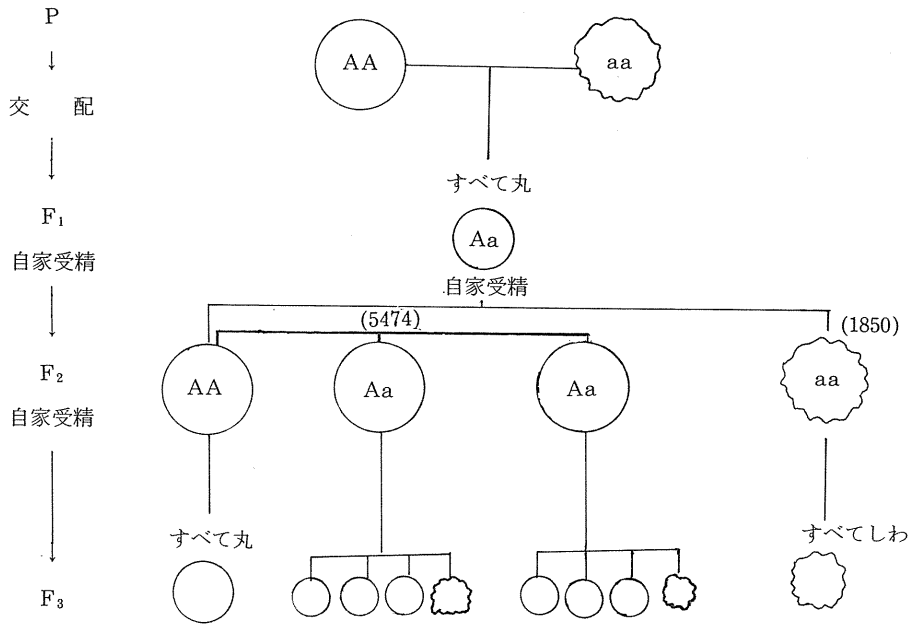
③ 優性の法則

単性雑種（一遺伝子雑種）

種子の形質についての交雑実験を例にとると次の図3のようになる。

この場合, F_1 には必ずいずれか一方の形質（種子の形では丸）が表現される。 F_1 に表現される

図 3 エンドウの種子の形の単性雑種



のを優性の形質とし、表現されないのを劣性の形質とした。対立形質の交雑においては、 F_1 には、 P のうち優性の形質が表現されることを優性の法則という。メンデルは、他の6対の対立形質についてもすべてこの種子の形と同じ形質の表われ方をすることを確かめた。

④ 分離の法則

種子の形に関する対立遺伝子を $A-a$ とする図3のように F_1 の遺伝子型は Aa となり、ヘテロ接合体であり、表現型は丸になる。この $F_1 Aa$ が配偶子を形成する時 $Aa(2n)$ は分れて A か a となりそれぞれの配偶子に入る。しかもその時配偶子の遺伝子型 (n) は、 $A : a = 1 : 1$ となる。これが分離の法則である。

この結果、表1のように4通りの組み合わせを生じ、遺伝子型で整理すると $AA : Aa : aa = 1 : 2 : 1$ となり、表現型で整理すると、丸 : しわ = 3 : 1 のいわゆるメンデル比となる。なお、

表1 F_2 の遺伝子型

	♂	♀	A	a
A	AA	Aa		
a	Aa	aa		

$F_1 (Aa)$ が配偶子を形成する時、 $A : a = 1 : 1$ に分離することは、メンデルはもどし交配によって確かめている。

⑤ 独立の法則

両性雑種 (二遺伝子雑種) 例えば種子の形と子葉の色 (黄色と緑色) を例にとると、2対の対立形質は、互いに独立に遺伝する。

ただしこの場合2対の対立遺伝子を次のように規定する。種子の形では A (丸) - a (しわ) とし、子葉の色については、 B は黄色、 b は緑色とする。

図5の結果、両親になかった新しい形質の組み合わせ (緑と黄) 生じている。

図4 両性雑種

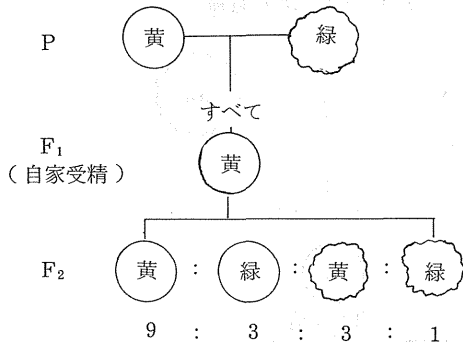
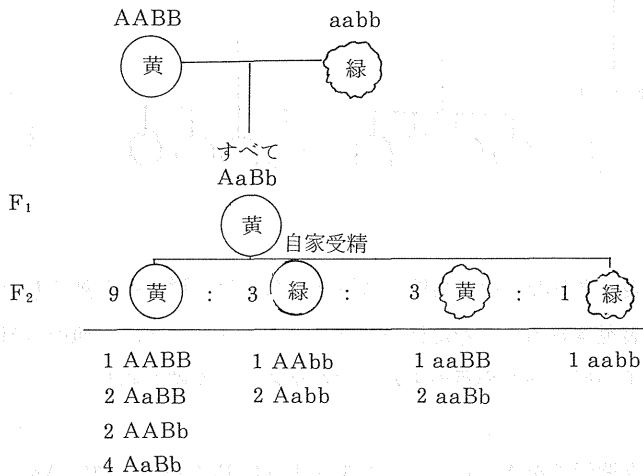
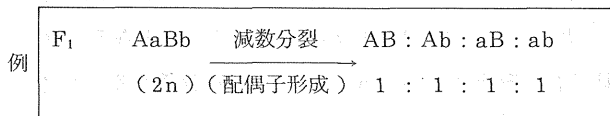


図5 両性雑種の表現型と遺伝子型



また、表現型の9:3:3:1の分離比は、どのように生じたのであろうか。
それは、F₁AaBb が配偶子を形成する時、A-aとB-bの2対の対立遺伝子が互いに独立あるいは自由に配偶子にそれぞれ分配されるからである。



このようにして生じた4種の配偶子が、はいのうにも花粉にも同数ずつ生じ、交配の結果16通りの組み合わせになる。遺伝子型で整理すると9種、表現型では4種、その比は9:3:3:1となる。
ところで、遺伝子の独立行動(自由配分)は、2組の対立遺伝子が2組の相同染色体に座を占めていることに起因する。

F₁(AaBb) が減数分裂で配偶子を形成する時の染色体の自由配分の結果、4種の配偶子が同じ

比で形成される。この事実は、1917年 Carothers が *Trimerotropis suffusa* で細胞学的に実証している。

図 6 染色体の自由配分

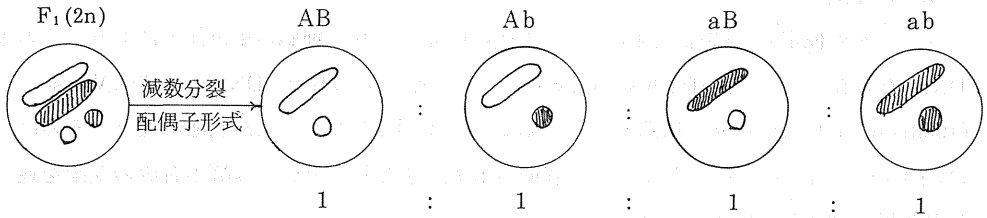
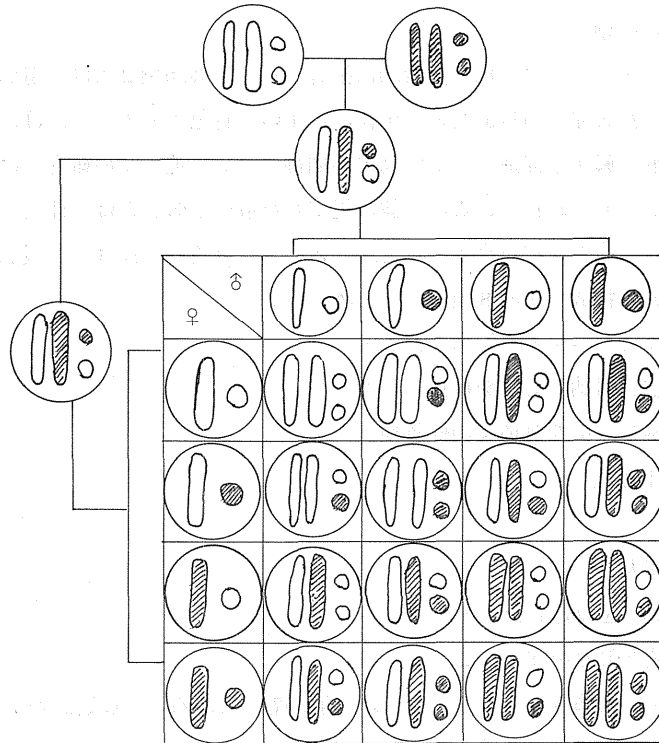


図 7 染色体の自由配分と独立の法則



(2) 遺伝形質の発現

多く実施されているのは、Griffith(1928)から Avery(1944)らの行った肺炎双球菌の形質転換実験の教科書の図を生徒に説明するタイプであろう。選択生物の教科書の特徴の1つは、HersheyとChaseの行ったファージの実験(1952)を「DNAは遺伝子の本体である」ことを実証した実験例として取り上げていることである。この実験を教材にする場合、ファージのプラークの観察などファージに関する実験を全くしないで生徒に説明しても、理解させることはかなりむずかしい

のではないかと考えている。

学校によっては、DNAに関する16mmの映画、NHKのVTRなどの視聴覚教材を見せて理解の促進をはかる試みも当然なされているのであろう。

(3) 相互関連

メンデルの仮定した(遺伝)因子は、その後の研究により、細胞の染色体上にあり、その本体はDNAであることが、Griffith~Averyらによって確かめられた。DNAの構造は、WatsonとCrick(1953)らにより二重らせん構造をしていることが提起された。これが刺激になり、そのはたらきは図1のようになっていることが、解明された。すなわち遺伝子は酵素合成の支配を通して形質の発現を調節しているのである。

展開例2

(1) メンデルの法則

展開例1では、メンデルの法則を直接的に指導したが、展開例2では、遺伝学の基本を構築したメンデルの行った研究上の特徴などを生徒に示すのが特色である。これは、メンデルの法則に対する生徒の理解と興味を促進する上で効果が期待できる。遺伝子の概念をはじめに提起した学者はメンデルであると言われているが、彼の規定した遺伝子概念とは一体何か、3法則に関連づけて指導すれば、生徒の理解を高めることができよう。篠遠喜人氏は、「遺伝学のあゆみ」の中でメンデルの研究の特徴を次の8項目にまとめている。

- ① 材料の選び方、エンドウを選んだこと。
- ② 研究の方法、帰納的方法を採用したこと。
- ③ 形質の単純化(単性雑種~両性雑種)。
- ④ 結果の統計処理。
- ⑤ 個体育種。
- ⑥ 問題の選び方。
- ⑦ 遺伝子(因子)を仮定したこと。
- ⑧ 科学の領域と限界を守ったこと。

これらの中でよく指摘されるのは、①、③、④、⑦、であろう。篠遠氏の⑦の中にもあるが、メンデルの仮定した因子は次の通りである。

- ① 生物の表わす形質は2個の因子によって決定される。(この因子は今日われわれが遺伝子とよんでいるもの)
- ② この因子は、両親からおのおの1個ずつ受けとる。
- ③ この親から子に伝達される因子は安定で変化しない。
- ④ 生殖細胞が形成される時に、この因子は分離しておのおの生殖細胞に入る。(分離の法則)
- ⑤ もしある性質に関して2個の異なった因子があった際には、その一方のみの性質があらわれる。(優性の法則)

(2) 遺伝子と形質の発現

展開例1では、教科書の図を中心として、DNA は遺伝子の本体であることを指導したが、展開例2では、これに加えて、次のような実験あるいは作業を生徒にさせ、DNA に関する興味を高め理解を促進することである。

① DNA に関する実験（DNA の検出、DNA の抽出、DNA の塩基分析のペーパークロマトなど）。

② DNA モデルづくり。

(3) 相互関連

展開例1と基本的に同じであるが、異なる点は、「形質発現」で実験や作業を加えて生徒の理解促進をはかることが特徴であろう。

展開例3

(1) メンデルの法則

展開例1～2をふまえ時間の余裕がある場合は、次のような指導が可能である。

① メンデルの生いたち

メンデルは、1822年モラビア（チェコスロバキアの中央部の地方）のブルーノの貧しい農家の長男として生まれた。学業成績が抜群で、担任の教師は上級学校への進学を勧めた。しかし、メンデルの学費を支出するほど家は豊かでなく、苦学を続けたが大学進学は断念せざるを得なかった。そこでメンデルは修道院の見習い牧師となった。

メンデルの所属したブルーノの女王修道院は、ジリルナップ院長のもとに特異な活動をしていた。

当時ヨーロッパは生活豊かになり、衣食住の向上が求められていた。そのような気運の中でモラビア地方では、羊やブドウらの品種改良の研究が行なわれていた。その研究の中心の役割をブルーノ修道院は果たしていたのである。

ナップ院長は、すべての牧師に3分野での活動を義務づけた。牧師としての宗教活動・学問分野での専門性・奉仕活動である。

当時、ブルーノ修道院には、ゲーテの「植物変形論」に感銘を受けたブラトラーネクがおり、彼の「品種改良の研究の発展のためにも、親から子へ形質が伝わるその法則性を解明する必要がある。」と説いていた。ナップはその考えに共鳴し、その法則の解明をクラーツェルに命じ、その状況の中でメンデルが修道院に来てそれを手伝い、研究を引きつぐのである。

メンデルは、ナップ院長から学問分野では、植物学で、しかも農業の品種改良を進める基礎となる遺伝の法則を解明することを要求されたわけである。奉仕活動ではメンデルははじめある病院で患者の世話をしていたが、メンデルの性格になじまないことを見抜いた院長は、学校の代用教員を命じた。これはメンデルの性格によく合い、彼は熱心に生徒も指導した。代用教員から正教員になる過程でウィーン大学へ留学する機会を与えられた。

この留学で彼は、動物学はもちろん、特に熱心に、ドップラーの実験物理学を学び、実験結果の数的処理の方法や、実験をすすめる上での帰納法を学ぶことができた。さらに彼は、レーデンバッハー教授の一般化学・分析化学を学び、その時ドルトンの原子説を知った。原子説とは、各元素はおのおの一定の性質と質量を持つ原子からなり、これら原子が結合して化合物を作り、化合物が分解されると、原子はもとのままの性質を失うことなく遊離してくるというものであった。又、AとBが結合して二種以上の化合物ができる時は、各化合物におけるAの一定量に対するBの量は簡単な整数比になっている。(倍数比例の法則)も学んだ。数学好きなメンデルは、原子説に興味を持ち、原子を遺伝子におきかえて生物を見る発想をここから引き出したのであろう。

② メンデルの実験動機

修道院の牧師であったメンデルが、何故エンドウを実験材料として遺伝の法則を明らかにしたのだらう、しかも、専門の研究者のなし得なかった素晴らしい仕事をメンデルはなしとげたのである。

このあたりは、メンデルの生いたちで明らかにした通りである。彼の実験の動機は2つの点にもとめられる。

イ、ジリルナップ院長から、遺伝の基本的法則性を明らかにするよう指示されたこと。代用教員から正教員になるために、もう一つ専門的教養をつむためなでから、ナップの努力で、ウィーン大学への留学が実現する。

ロ、進化的観点。1859年は、C. Darwin の種の起原の初版本の発表年である。当時、ヨーロッパの生物界は進化の問題で沸騰していた。メンデル自身 Darwin の種の起原を読んでいたという。

彼は論文の中で次のようにのべている。はじめ人為的受精を観葉植物にほどこして新しい色がわりを得ようとするのが行なわれてきたが、これが、ここにのべる実験の動機だった。同じ雑種がおどろく程規則正しく現われることは、同じ種のあいだで受精を行った場合、ひじょうに多いので、それにはげまされて、その上の実験をくわだてたのであるが、その目的は、雑種がその子孫にいかに関係していくかを追求するかにあった。」 篠遠喜人「メンデル遺伝法則発表100年記念にあたって 遺伝学のあゆみ」

③ メンデル以前の雑種に関する研究

メンデルが研究をはじめの前に、雑種に関する現状はどうだったのか、それをメンデルはどの程度利用したのか。また、何故それらの学者は、「メンデルの法則」を明らかにすることができなかったのか、などを生徒に指導することが、ここでは重要であろう。

(イ) J.G.ケルロイターは、メンデルより百年ほど前にタバコやオシロイバナをはじめ、いろいろな植物を用いて雑種を作り、相互交雑の F_1 の間には殆ど差異がないこと、雑種は多少両親の中間性を現すこと、雑種の繁殖力に関しては、両親の組み合わせにより正常より完全不稔に至る種類の程度を示すこと、もどし交雑をくり返して行くことについては一方の親と殆ど差別がなくなること、雑種は時としてその成長の旺盛なる点に於て両親をしのぐことなどを明らかにした。

(ロ) T.A. ナイト(1799)は、メンデルと同じくエンドウを用いて交雑の実験を行い、紫花と白花

との F_1 は紫花で、これにさらに白花をもとし交雑するとその子植物には紫花を開くものと白花を開くものができること、すなわち分離の現象を見たが、その両型の数比には注意しなかった。

(v) J. ゴス (1822) もまた、エンドウに於て、種実の緑色のと黄色のとは何れも子葉の色に由ることを正しく指摘し、緑エンドウの花を黄色エンドウの花粉を以て受精せしめると、それより生ずる種実は全部黄色エンドウで、他花受粉をしない花から出来るものはすべて緑エンドウであること、並に交雑に依て生じた白エンドウから出来た次代の植物は、一株の中に黄色エンドウのみを有するさやと、緑エンドウのみのさやと、両者混合のさやとを存すること、緑エンドウは次代に於て緑エンドウのみを生ずることなどを記載した。

(vi) C.F. ゲルトナー (1849) もはなはだ多数の植物の種間雑種を作ったが、その結果はケルロイターの到達した領域を多くでなかった。しかしメンデルはその論文中に於て最も深い関心をゲルトナーの研究に払い、詳細に論評している。

(vii) C. ノーダン (1862) はメンデルの直前に於て多くの植物の異種交雑を行い、雑種の性細胞の一部は父と同一の要素を、他の一部は母と同一の要素をに成ること、これがために F_1 は表面的に殆ど齋一で F_2 は雑駁になること等、メンデルの発見した法則の一部にきわめて近い所まで到達した。

このように、多くの学者は、「メンデルの法則」の直前にせまりながら、法則性を明らかにすることができなかったが、メンデルはその研究の特徴、③、④、⑤、⑦、などを生かして、偉大な法則を見つけることができた。

④ メンデルの法則の無視された原因

メンデルの研究家で、メンデルの伝記を書いたイルチス氏は2つの理由をあげている。

イ. 1865年当時は、Darwin の種の起原の提起した思想の洪水が飽和に達していて、メンデルの変った実験と結論を冷静に受けとれる余地がなかった。

ロ. メンデルの深く尊敬するネーゲリ先生が、メンデルの研究の真価がわからなかったか、無視した。

しかし、当時の細胞学がメンデルの法則を理解する段階に達していなかったのが、真の原因であろう。その証拠には、1900年の再発見後は、メンデルの法則は正しく評価された。1900年になると、細胞分裂、受精、発生などにおける染色体の行動が、ほぼ理解されていたからである。

(2) 遺伝子と形質の発現

「遺伝子の本体がDNAである」ことを実験により生徒を指導する場合、最良の実験の1つは、歴史的にも、現在でも形質転換の実験であろう。歴史的には肺炎双球菌であるが、現在はナットウ菌 (*Bacillus nutto*) の仲間である枯草菌 (*Bacillus subtilis*) を用いる。この wild の w23 は、最小培地にコロニーを形成する(+)が、mutant である Ys_{11} は、 ade^- 、 leu^- 、 arg^- 、で最小培地に、アデニン、ロイシン、アルギニン、を加えないと、コロニーを形成しない(-)、栄養要求性突然変異である。

この実験は、表2のようにまず遺伝形質を確かめることから始める。

表 2 Bacillus Subtilis の遺伝形質

	M	Ade ⁻	Leu ⁻	Arg ⁻	A11
W23	+	+	+	+	+
YS11	-	-	-	-	+

+ コロニー形成
- コロニー形成せず

つぎに①～④の順で実験をすすめる。

- ① w 23 を培養し生菌より DNA を抽出する。
- ② Ys11 を特殊な培養で外来性の DNA を取り込める状態 (competent CPYS11) にする。
- ③ CPYS11 に, w23 DNA を処理する。
- ④ 選択培地で転換菌を選択する。

①に関連し, DNA の塩基分析が併用できる。なお, 形質転換の他に, ファージを用いた実験も, この単元の指導では有効である。前にものべたように, Hershy と Chase の実験が選択生物では取り上げられている。この実験を理解させるため, ファージの生活環を調べる実験などを実施すると, 生徒の興味と理解を一段と高めることができる。またファージなどでは, より発展した実験をすすめることも可能である。

この場合は, 古典遺伝学の時のメンデルの因子, Morgan の染色体地図のころの遺伝子概念と比較して, 分子遺伝学の遺伝子概念は, ファージ実験をもとに, cistron, muton, recon と発展してくることを, その概念を提起した実験を生徒に経験させながらより具体的に指導できる利点がある。

展開例 4

個々の具体的な指導内容ではなしに, 「遺伝」と「遺伝子と形質発現」を分離せずに統一的に指導することで, まさに両単元の統一である。

遺伝学の発展を歴史的に見ると次の段階にまとめることができるであろう。

- ① 個体レベルにおける形質の伝わり方の法則性を明らかにした段階。

メンデルの法則と1900年以降に明らかにされた形質遺伝の解明。

- ② 細胞レベルにおける染色体地図の段階。

T.H. Morgan らによるショウジョウバエを用いた染色体地図。遺伝子は染色体にあり遺伝学的に, 細胞学的に染色体地図が作成されていく段階である。

- ③ 分子レベルにおける Watson と Crick のモデルの段階。

Griffith~Avery あるいは Hershey と Chase により, DNA は遺伝子の本体であることが実証された。これを背景に DNA の X線回折, DNA の塩基分析などのデータを統合して Watson と Crick は DNA モデルと複製モデルを提起する。これが刺激となり, その後分子遺伝学が開花し, セントラルドグマが完成する。

- ④ 生命現象の統一的理解と応用。

分子遺伝学の発展は、生物学の一分科の域を脱して生命現象の本質的理解の域に達した。応用分野の遺伝子の改良、あるいは遺伝子工学、生命の合成などと発展してきた。しかしこのような発展は、両刃の剣として例えば神への挑戦者とか、人間の想像できない有害な微生物の出現の可能性などということでも批判も多い。

Ⅲ おわりに

「遺伝」と「遺伝子と形質の発現」の2つの単元の指導内容とその展開例について4つの展開例、あるいはパターンを示してみた。

生徒の認識の発展の通性からすれば、端的に「メンデルの法則」について教えるよりも、「法則」を生み出したメンデルが、エンドウを用いて実験をはじめた動機や当時のこの分野の到達のレベルなどについて、「法則」を理解させるという観点で、いろいろ話しをしてやることの方がはるかに生徒の興味や理解が高まるのは当然であろう。

同じことは「遺伝子と形質の発現」についてもいえる。枯草菌を用いた形質転換の実験やフェージを用いたいろいろな実験を合理的に展開していく中で、理解の困難な内容も、生徒には比較的理解されやすくなる。そして、これらの実験をへた後に、DNAとタンパク質の関係について指導するのであるならば、より本質的な理解を得ることができるであろう。

ただし、このような指導には、時間と設備、ならびに費用がかかる。だから、どの学校でも実施可能だという訳にはいかない。そのような関点で、いろいろ批判がでるであろう。

あるいは、パターンの組み合わせについて異論があっても当然である。

筆者がここで取り上げたのは、「遺伝」と「形質発現」についてであるが、このようなケースは、すべての単元について適応できるであろう。

すべての教師が、すべての単元について、望ましい最高の授業をすることなどは、到てい現実には不可能である。むしろ、それぞれの教師が、最も得意とする分野で何か一つ生徒に、自然科学とは何かを印象づけるような授業ができればよいのではないかと考えている。

Ⅳ 引用文献

- 1 遺伝学のあゆみ メンデル遺伝法則100年記念出版委員会編 裳華房
- 2 メンデルの発見 中沢信午 共立出版
- 3 細胞学 桑田義備編 培風館
- 4 基礎遺伝学 田中義麿 裳華房
- 5 ピーコック・ドライスデール 分子遺伝学入門 池田庸之助 斎藤日向 すずす書房