

メンデル遺伝の問題解決における方略と知識

藤田 剛志

I 目的

多くの学習者にとって、遺伝は理解困難な学習内容であるといわれている。たとえば、Johnstone と Mahmoud¹⁾は、スコットランドの大学生、高校生を対象として、生物内容の難しさ度を調査した。その調査によれば、遺伝は、エネルギー保存、進化、生体内での水輸送 (water transport) とともに、最も難しい内容の一つであることが明らかにされた。

遺伝学習を難しいと捉えているのは、学習者だけではない。Finley ら²⁾は、アメリカで広く用いられている高校生物の教科書の中から、50の内容項目を選定した。そして、それらの内容が高校生にとってどの程度難かしいものであると考えられるかを、現職の高校生物教師100人を対象にして調査した。その結果、高校生には難しいと判定された上位15の内容項目のうち、遺伝に関する内容は6項目含まれていたのである。すなわち、遺伝は生徒にとってかなり理解困難な内容である、と教える側の教師も認めているのである。

これらの調査結果が示すように、生徒も教師もともに、遺伝の内容は難しいと捉えている。しかし、一方では、教育内容としての遺伝の重要性は、ますます高まってきている。山極・江田は、「遺伝と進化は、日常生活でもよく話題となることであるばかりでなく、疾病と形質の根本的相違を理解することは人権尊重の教育の一貫として大切であり、品種改良や今日のバイオ技術の理解にもつながるという重要な位置を占めている」³⁾と述べている。つまり、生物領域において、遺伝は不可欠の教育内容と考えら

れているのである。

以上のことから、遺伝は学習困難であるが、不可欠の内容であるというパラドックスを内包しているということができよう。それ故に、Radford と Bird-Stewart が指摘するように、「学校で遺伝学を教え続けることが望ましいことであるならば、(中略) それらの知的内容を薄めることなく、学習困難を軽減するために、何をなし得るのか」⁴⁾は、遺伝教授にとって緊急に解決しなければならない重要な課題として存在するのである。

この課題の解決に向けて、最近、遺伝内容に即した問題解決過程についての研究が盛んに行われるようになってきている。この種の研究は、2つのカテゴリーに分けることができよう。一つは、専門家 (expert) と初心者 (novice) の問題解決行為の比較に焦点をおく研究である。もう一つは、生徒自身の問題解決過程の分析を中心に扱う研究である。

まず、前者のカテゴリーに含まれる例を挙げる。Smith と Good⁵⁾は、古典遺伝学の問題を解く過程を分析し、専門家と初心者の問題解決行為を区別する32の傾向を見いだした。たとえば、専門家は問題を分析と推論を必要とする課題であると認識していること、「前向き作業 (forward-working)」⁶⁾のアプローチをとること、そして、その作業の正しさを初心者よりも頻繁に吟味する傾向があること、である。さらに、問題解決に関する専門家の知識は、問題に適用できるように構造化されていることが明らかにされた。

Hackling と Lawrence⁷⁾は、家系図問題を用いて、専門家と初心者の問題解決行為を比較した。その結果、両者の正答数には違いはみら

れなかったが、解答の完全性、包括性に関して違いがみられた。さらに、仮説の設定、検証の仕方に大きな違いがみられた。

次に、生徒の遺伝問題解決過程の分析に焦点をおいた研究を挙げる。Stewart⁸⁾は単性雑種と両性雑種の問題を高校生が解くとき、どのような知識、方略を用いるのかを調べている。彼は、両性雑種交配の問題解決の方略として、高校生が代数法 (algebraic method)、碁盤法 (Punnett square method)、代数法と碁盤法の併用といった方略を用いていることを明らかにした。また、こうした方略を用いるとき、減数分裂に関する知識がそれらの方略に十分関連づけられていないことを指摘している。

さらに、Stewart⁹⁾は手続き的知識 (procedural knowledge) と概念的知識 (conceptual knowledge) とに照らして、遺伝の問題解決過程を分析した。その結果、減数分裂に関する概念的知識が不十分であるために、生徒は遺伝問題を解くときに手続き的な誤りを犯すこと。正しい答えを導いた生徒でさえ、自分達のとった手続きを減数分裂と配偶子型の決定に関する概念的知識に照らして、正当化することができないことを明らかにした。

これらの研究から、Stewart は遺伝の問題解決において、最も難しいことは問題解決に減数分裂に関する知識を関連づけることであると述べている。この主張は、Tolman¹⁰⁾、Moll と Allen¹¹⁾の研究によっても支持されている。

問題解決に関する上記の研究によって、諸外国では、生徒の遺伝問題解決がどのような知識に基づいて行われているのか、どのような学習困難に遭遇するのか、仮説の設定、推論の仕方は専門家とどのように異なるのか、などが次第に解明されつつある。そして、これらの知見に基づき、遺伝学習の困難を軽減し、生徒に有意義な学習を促すための授業への示唆がいくつか述べられてきている¹²⁾。

ところで、わが国の状況はどうであろうか。大塚と小林は、「かつて、現代化によって内容の精選が行われたときに、学習がやや高度になりがちであるという理由で (中学校の理科から

遺伝は) 軽減・削除された内容で、そのこと自体はその後改善されているものではない (括弧内引用者)¹³⁾、と述べている。この言葉に象徴されるように、遺伝の学習困難は何か、困難をどう克服するかについては、わが国では、未だ、十分に解明されていないといえよう。

そこで、本稿では、上記の先行研究を踏まえながら、わが国の高校生が、メンデル遺伝の問題解決において、どのような方略を用いるのか、それらの方略がどのような知識に基づいているのかを明らかにすることを目的とする。これらの方略、知識を明らかにすることによって、遺伝学習の困難点について考察し、遺伝の授業を改善するための基礎としたい。

II 方法

上記の先行研究では、データ収集の方法として、発語思考法 (thinking aloud method)¹⁴⁾が広く用いられている。この方法は、被験者に問題を呈示し、問題を解いている間に頭の中で考えていることをすべて口に出してもらい、それをテープレコーダーに記録する。この記録はプロトコルと呼ばれ、プロトコルの分析を通して、問題解決者の方略や知識などが調べられる。

この方法は、認知科学では、信用できる重要なデータ収集法として、広く用いられている¹⁵⁾。しかし、データの収集、分析に時間がかかりすぎるため、被験者数が限定されてしまうという問題がある。本研究では、ある程度まとまった数の被験者がどのような方略、知識を用いているのかを明らかにすることを目的とするので、発語思考法は用いなかった。

本研究では、被験者にメンデルの遺伝に関する文章題を記述式で答えるように求めた。答えるにあたっては、答えを記述するだけでなく、答えに到達するまでの思考過程を記述するように指示した。また、問題を解く過程で、分からないところがあれば、それらを書き留めておくように指示した。

実際の調査では、被験者に4問の問題解決を求めたが、本稿では、そのうちの2問について

報告する。一つは、ヒトの眼の色に関する単性雑種交配の問題、もう一つは、眼の色と色盲に関する両性雑種交配の問題である。

調査問題

1. ヒトの眼の色は、褐色を優性として、青色を劣性として遺伝する。青色の眼の男子が、褐色の眼の色の女子（その母親は青眼であった）と結婚した。この夫婦から、青色の眼の子どもはどのような割合で生まれるか。褐色の遺伝子をB、青色の遺伝子をbとして、答えよ。
2. ヒトには、フェニル・チオ・カーバマイド(PTC)の味を感じる人と感じない人がいる。この形質は遺伝する。味を感じる遺伝子(A)は、味を感じない味盲の遺伝子(a)に対して優性である。また、褐色眼の遺伝子(B)は、青色眼の遺伝子(b)に対して優性である。いま、両親ともにA a B bの遺伝子型を持つ場合、青い眼で味を感じる子どもは、どのような割合で生まれるか。

被験者は、茨城県の私立高校の生徒90人である。その内訳は、高校1年生が43人、2年生が47人である。調査時には、理科Iで、既にメンデル遺伝について学習していた。調査は、1987年6月に行った。

Ⅲ 結果および考察

まず、それぞれの設問ごとに、被験者が問題解決で用いた方略について述べる。次に、それらの方略がどのような知識に基づいているのかを検討する。

1 遺伝問題解決の方略

a 単性雑種交配の場合

単性雑種交配の問題解決において、どのような方略が用いられたのであろうか。解答を分析すると、問題解決の方略として、次の二つの方略を見いだすことができた。一つは、図1のよ

うに、対立遺伝子を組み合わせるものである(以下、組み合わせ法と呼ぶ)。この方略では、生徒は、まず、親の遺伝子型を決定した。次に、点線で示すように、片方の親の対立遺伝子対の一つを他方の親の対立遺伝子に順番に組み合わせ、子の遺伝子型を決定し、表現型の比を求めた。

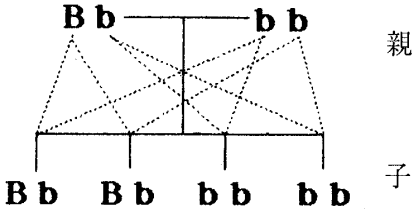


図1 組み合わせ法

もう一つの方略は、図2のような碁盤目を用いる方略である(以下、碁盤法と呼ぶ)。この方略では、生徒は、まず、親の遺伝子型から、配偶子型を決定した。そして、父親と母親の配偶子型を碁盤目の上段と左端に配置し、それぞれをかけあわせて、子の遺伝子型を求めた。

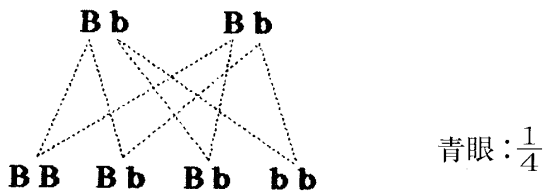
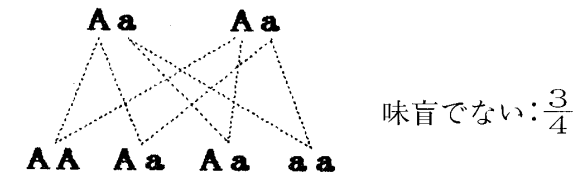
♂ \ ♀	B	b
b	Bb	bb
b	Bb	bb

図2 碁盤法

b 両性雑種交配の場合

問題解決の方略として、3種類の方略を見いだすことができた。第一に、碁盤法を用いた解答である。単性雑種の場合と同様に、生徒は、まず、親の遺伝子型から、配偶子型を決定した。次に、この配偶子型を碁盤目に配置し、それぞれをかけあわせて、子の遺伝子型を求めた。

第二の方略は、図3に示すように、一つの形質に着目して、それぞれの出現する割合を求め、それらが同時に生じる場合の確率を代数的に解く方略である(以下、代数法と呼ぶ)。



$$\frac{3}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{3}{16}$$

図3 代数法

第三の方略は、単性雑種交配における組み合わせ法の場合と同様に、配偶子型を明確に決定することなく、親の遺伝子型から、直接、子の遺伝子型を求めようとする方略である（これを両性雑種交配の組み合わせ法と呼ぶ）。この方略には様々なバリエーションがみられた。

一つは、樹系図を作り、4つの遺伝子記号の順列から、16通りの子の遺伝子型すべてを求めた方略である。第二のバリエーションは、まず、子の遺伝子型の9通りの組み合わせ（AABB、AABb、AAbb、AaBB、AaBb、Aabb、aaBB、aaBb、aabb）を決定する。次に、それぞれの場合の数を算出し、あらゆる場合の数を求め、設問で要求された比を求める方法であった。最後は、配偶子型を特定することなく、子の遺伝子型の組み合わせを求めようとするが、組み合わせの数が多いため、両性雑種におけるF₂の分離比が9:3:3:1になることを適用して、表現型の比を求める方略であった。

c 各方略の採用者数

各設問ごとに、碁盤法、組み合わせ法、代数法の方略を採用した被験者数を正答者と誤答者

に分けて表1に示す。誤答者の解答は、碁盤目が記述されていれば碁盤法、碁盤目が記述されておらず、親の遺伝子型から、直接、子の遺伝子型を求めた場合は組み合わせ法と分類した。両性雑種問題において、一つの形質に着目し、代数的に解こうとした場合は、代数法と分類した。

単性雑種問題では、碁盤法および組み合わせ法を採用した被験者は、正答者と誤答者を合計すると、それぞれ17人と29人であった。両性雑種問題の場合、碁盤法、組み合わせ法、代数法を採用した被験者は、合計すると、それぞれ、29人、18人、4人であった。なお、無答者は、単性雑種問題で16人、両性雑種問題で32人であった。答しか記述しなかった被験者は、単性雑種問題で26人、両性雑種問題で7人であった。上に挙げた3つの方略に分類できなかったその他の方略を採用した被験者が単性雑種問題で2人いた。

表1 方略の採用者数

方略	単性雑種		両性雑種	
	正答	誤答	正答	誤答
碁盤法	15	2	14	15
組み合わせ法	19	10	5	13
代数法			2	2

組み合わせ法を用いた場合、単性雑種問題では、正答に到達する被験者は19人いたが、両性雑種問題では、5人しかいなかった。一方、碁盤法の正答者数は、問題によって、ほとんど変わらない（単性雑種=15人、両性雑種=14人）。ところが、誤答者の数は、単性雑種問題に比べると、両性雑種問題では大幅に増加している（単性雑種=2人、両性雑種=15人）。

問題によって、被験者が採用する方略が異なったり、誤答者が増加するのはなぜなのだろうか。次に、被験者の典型的な誤答を分析することによって、これらの方略の背後にある知識について検討する。この検討を通して、これらの方略はどのような知識に基づいて用いられて

いるのか、逆にいえば、どのような知識が不十分あるいは欠如していると、問題解決をうまく行うことができないのかを明らかにできると考えられる。

2 問題解決における知識

a 単性雑種交配の場合

まず、碁盤法にみられた誤答から分析する。誤答者は二人いた。一人は、図4に示すように、父親の遺伝子型をb、母親の遺伝子型をBとして、碁盤法を用いて解答した。この生徒の場合、親の遺伝子型がそのまま配偶子型であると混同していた。このことから、一つの形質に対して、遺伝子は対になっているという知識が欠如していたと考えられる。さらに、減数分裂によって、遺伝子対の一つが配偶子にはいるという知識の欠如も見られた。

♀	B
♂	Bb
b	Bb

図4 遺伝子型と配偶子型の混同

もう一人は親の遺伝子型を正しく決定することはできた。しかし、上の場合と同様に、親の遺伝子型をそのまま配偶子型であると考えてしまった。すなわち、配偶子型がBb、bbの二倍体のままで、両者を交配したのである。その結果、子の遺伝子型は、Bbbbの四倍体となってしまった。ここでも、上の場合と同様に、減数分裂によって、対立遺伝子は互いに分かれ、一つずつ異なった配偶子に分配されるという、分離の法則に関する知識の欠如が見られた。

次に、組み合わせ法を用いた場合の誤答を分析する。この方略を用いた誤答者は10人であった。全員、正しく親の遺伝子型を決定することはできていた。そのうちの7人は、両親の遺伝子型から、配偶子型を決定するという手順を踏まずに、直接、子の遺伝子型を求めようと試み

た。しかし、遺伝子をどのように組み合わせればよいのかわからず、そこで解答が止まってしまった。

他の3人は、どうにか親の遺伝子を組み合わせ、子の遺伝子型を求めることができた。しかし、その表現型の分離比はBb : bb = 3 : 1であった。解答の途中経過には、bbが2つ記入されていたにもかかわらず、一方のbbはBbに修正されていた。単性雑種交配の学習において、特に、3 : 1の分離比が印象深く残っていたと考えられる。このことは、誤答者のうち、答えだけ記述した者を含めると、23人が3 : 1と答えていたことから裏づけられる。親から子へ、遺伝子が伝わることを生徒は理解できるとしても、それがどのように伝わるのか、すなわち遺伝のメカニズムに関する知識があいまいであったために、3 : 1の記憶に頼り、一方のbbをBbに修正したと考えられる。

b 両性雑種交配の場合

碁盤法の方略を用いた誤答からみていく。誤答には、三つのタイプがあった。第一に、図5に示すように、配偶子に一つの対立遺伝子しか含めない誤答である。この種の誤答を生じた生徒は、配偶子が形成される時、対立遺伝子が減数分裂によって、一つずつに分離することは理解していた。しかし、分離した対立遺伝子を配偶子と混同していた。すなわち、一つの配偶子の中には、各対の対立遺伝子が分離して、それぞれ独立に、一つずつ分配されることを理解していなかったのである。

	A	a	B	b
A	AA	Aa	AB	Ab
a	Aa	aa	aB	ab
B	AB	aB	BB	Bb
b	Ab	ab	Bb	bb

図5 一遺伝子による配偶子表示

第二のタイプの誤答は、問題文に明記されている親の遺伝子型を真ん中で半分に分け、配偶子型と考えるものである(図6参照)。このタ

イブに属する生徒は、配偶子型は二つの遺伝子記号を含むこと、交配の結果、子の遺伝子型は四つの遺伝子記号から構成されることは理解していたようである。しかし、どの二つの記号をかけあわせて、四つの遺伝子記号を求めればよいのかを理解していなかった。つまり、どのようにして配偶子が形成されるのか、受精によってそれらの配偶子はどのように組み合わせられるのかに関する知識が不十分であったといえよう。

♂ \ ♀	A a	B b
A a	A A a a	A a B b
B b	A a B b	B B b b

図6 単純分割の配偶子型

最後は、図7に示すような誤答である。まず、生徒は、単性雑種交配の問題と同様に、一つの形質に対して、子がとりうる遺伝子型の組み合わせを決定した。それらの遺伝子型の組み合わせをそれぞれの形質ごとに碁盤目に配置し、それらをかけあわせて、子の遺伝子型が求められた。確かに、この方略でも、A aとB bがそれぞれ2通りあることを考慮してかけあわせるならば、正しい答えを得ることができる。現に、そうして、いわゆる正答を導いた生徒が2人いた。

	A A	A a	a a
B B	A A B B	A a B B	a a B B
B b	A A B b	A a B b	a a B b
b b	A A b b	A a b b	a a b b

図7 遺伝子記号の組み合わせ

答えだけを求めるような問題では、この方略を用いても、場合の数を考慮すれば正答を得ることはできるであろう。しかし、この方略では親の配偶子型が正しく決定されていない。つま

り、減数分裂における配偶子の形成や配偶子のランダムな受精といった現象に関する知識とは無関係に、遺伝子記号の操作が行われていたと考えられる。このことが、上のような誤答を生み出した理由の一つと考えられる。

代数法の誤答者は、一つずつの形質に対しては、それぞれが出現する確率を求めることはできた。しかし、それらの値をかけあわせて、二つの形質が同時に出現する確率を求めることはできなかった。

なぜ、できなかったのだろうか。単に、独立事象の確率を求める数学的な能力がなかったからであろうか。それとも、能力はあったにも関わらず、それぞれの形質が出現する確率をかけあわせることに躊躇したからなのであるか。躊躇したとすれば、それは、2対の対立遺伝子が互いに独立に配偶子に分配されるということイメージできなかったからではないだろうか。この点については、さらに詳しく調査する必要がある。

組み合わせ法の方略を採る生徒によくみられた誤答は、青い眼で味盲でない子どもの割合を2/9あるいは2/8と答えるものであった。子のとり得る遺伝子型の組み合わせのすべての場合の数は、全部で16通りある。しかし、これらの生徒は、図7に示したのと同じ、9通りあるいはそれ以下の数の組み合わせしか求めなかった。確かに、9通りの中で考えるならば、答えは2/9となる。しかし、なぜ、子のとり得る遺伝子型の組み合わせの数は、全部で9通りであると考えたのであろうか。

教科書などでは、遺伝子型はA a.B Bと表記されている。だが、A aについては、どちらの両親から継承されたのかによって、2通りの場合がある。上で、場合の数を9通りとした誤答者はこのことを忘れていたと考えられる。彼らは、教科書等に表記されている遺伝子型の可能な組み合わせをすべて挙げれば、それがすべての場合の数であると思いこんでしまっていたと考えられる。配偶子の形成、生殖に関する知識を問題解決の方略に関連づけなかったために、9通りですべての場合の数がつきたと思ってし

まったのであろう。

以上の分析から、誤答者に共通していえることは、配偶子がどのように形成されるのかに関する知識が欠如していたり、不十分であったということである。このことは、減数分裂時の染色体分離に伴って、対立遺伝子がどのように配偶子に伝えられるのかに関する知識が遺伝の問題解決に十分関連づけられていないことを意味する。この結果は、Stewart や Tolman らの主張を裏づけるものである。

IV 結 語

バイオテクノロジーの発達などに伴い、遺伝に関する興味・関心がますます高まってきている。しかし、遺伝は学習者にとって理解困難な内容である。生物教育にとって、遺伝が不可欠な内容である限り、この学習困難を軽減し、生徒たちが遺伝に関することがらを有意義に学習できるように、授業を改善していかなければならない。

本研究は、この課題を解決するための基礎資料として、わが国の高校生が遺伝の問題解決においてどのような方略および知識を用いているのかを明らかにするために行われた。この目的を達成するために、被験者にメンデル遺伝に関する問題を呈示し、解答に至るまでの思考過程を含めて、記述式で答えてもらった。その結果、次のような知見が得られた。

まず、問題解決の方略に関して述べる。単性雑種交配の問題解決では、生徒は碁盤法および組み合わせ法の方略を用いていた。両性雑種交配の問題では、生徒は、碁盤法、組み合わせ法のほかに、代数法を用いていた。

遺伝の問題解決に関する生徒の知識に関しては、誤答分析の結果、誤答者に共通していることとして、次のことが明らかにされた。すなわち、減数分裂時の染色体分離に伴って、親の遺伝子が配偶子にどのように伝えられるのかに関する知識が欠如していたり、不十分であった、ということである。

これらの結果から、減数分裂の現象を遺伝学

習に関連づけることに、高校生は学習困難を抱えていると考えられる。このような関連づけがあいまいであるが故に、機械的な遺伝子記号の操作が行われたり、3:1や9:3:3:1の分離比のみの暗記で遺伝の学習が終わってしまうのではないだろうか。親の遺伝子が、減数分裂によって配偶子のなかにどのように伝わり、それが受精によってどのように子に伝わるのか、言い換えれば、対立遺伝子の行動を減数分裂時の染色体の行動や受精時のランダムな組み合わせに関連づけて、遺伝現象を学習することが重要である。

文献および注

- 1) Johnstone, A. H. and N. A. Mahmoud (1980) Isolating topics of high perceived difficulty in school biology. *Journal of Biological Education*, 14 (2), 163-166.
- 2) Finley, F. N., J. Stewart, and W. L. Yarrock (1982) Teachers' perceptions of important and difficult science content. *Science Education*, 66 (4), 531-538.
- 3) 山極隆・江田稔 編著(1989) 中学校新教育課程の解説 理科. p.151, 第一法規.
- 4) Radford, A. and J. A. Bird-Stewart (1982) Teaching genetics in schools. *Journal of Biological Education*, 16 (3), 177.
- 5) Smith, M. U. and R. Good (1984) Problem solving and classical genetics: successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching*, 21 (9), 895-912.
- 6) 最終的に明らかにしなければならない未知量を見だし、未知量から既知の量へと、後ろ向きに解いていくことを後ろ向き作業という。これに対して、問題文中の既知量の組み合わせによって、求めなければならない未知の量へと前向きに解いていくことを前向き作業という。
(波多野誼余夫 編(1982) 認知心理学講座4 学習と発達. p.67,143. 東京大学出版会)
- 7) Hackling, M. W. and J. A. Lawrence (1988) Expert and novice solutions of genetic pedigree problems. *Journal of Research in Science Teaching*, 25 (7), 531-546.

- 8) Stewart, J. H. (1982) Difficulties experienced by high school students when learning basic Mendelian genetics. *The American Biology Teacher*, 44 (2) , 80-84, 89.
- 9) Stewart, J. (1983) Student problem solving in high school genetics. *Science Education*, 67 (4) , 523-540.
- 10) Tolman, R. R. (1982) Difficulties in genetics problem solving. *The American Biology Teacher*, 44 (9) , 525-527.
- 11) Moll, M. B. and R. D. Allen (1987) Student difficulties with Mendelian genetics problems. *The American Biology Teacher*, 49 (4) , 229-233.
- 12) 藤田剛志 (1990) 遺伝学習の困難点とその改善について. 東海女子短期大学紀要, 16, 123-134.
- 13) 大塚誠造・小林学 (1989) 中学校理科 新旧学習指導要領の対比と考察. p.185, 明治図書.
- 14) 坂本昂編 (1983) 現代基礎心理学 7 思考・知能・言語. p.49, 東京大学出版会.
- 15) 佐伯胖 (1986) 認知科学選書10 認知科学の方法. p.140-141, 東京大学出版会.

SUMMARY

Strategies and Knowledge in Solving Mendelian Genetic Problems

Takeshi FUJITA

Genetics has been identified by the preceding researches as important and difficult for students to learn. In order to assist students to learn genetics in a more meaningful way, the author examined strategies used by 90 high school students to solve two types of Mendelian genetic problems, and analyzed the errors made by them to identify the knowledge underlying those strategies.

The results of this examination and analysis may be summarized as follows:

1. Subjects used more strategies than Stewart had pointed out. Algebraic method, Punnett square method, and other varieties of method were used to solve the dihybrid cross problem.
2. In subjects who erred in this genetic problem solving, the knowledge regarding the meiotic division was deficient.

These findings implicated that it is important for students to learn the Mendelian genetics by associating the alleles with chromosome behavior during the meiosis.

Key words

genetics	problem solving	strategy
knowledge	difficulty	