

「ヒトの眼と色覚」に関する発展的授業教材

—色覚のしくみとバリアフリー—

理科 安形和之

ヒトの眼は、光の受容による視覚と色の識別に関わる色覚という2つの重要な働きをもつ。これらは網膜にある杆体、錐体と呼ばれる2種類の視細胞が感受する。光の明暗は杆体細胞、色の識別は錐体細胞が働く。授業では、色覚のしくみを深く理解させるために、伴性遺伝の基礎事項と遺伝子解析の進展により教科書では説明できない事例について紹介した。また、意外と知られていない色覚バリアフリーについても関心をもたせるように工夫した。

<キーワード> 赤錐体 (赤オプシン)、緑錐体 (緑オプシン)、色覚異常、色覚バリアフリー

1. はじめに

「動物の刺激の受容と反応」の単元で、まず光の受容としてヒトの眼の構造について学ぶ。各部位の名称だけでなく、視細胞の働きや遠近調節の仕組みなど基本的事項を学習する。ここでは、「眼の構造と働き」における授業展開の中で、遺伝分野の単元で学習する伴性遺伝の例として教科書に必ず載っている色覚異常の遺伝は実際には成り立たないことがあることを、遺伝子レベルで理解させるような授業教材の例を紹介する。また、本校の生徒は将来保育士や教師を目指す者が多いので、教師が授業を行うにあたって、色覚異常の児童や生徒に対する配慮（色覚バリアフリー）について注意すべき点をいくつか提示する。

2. ヒトの眼の構造と色覚に関する基本事項

(1) 眼の構造と働き

ヒトの眼の働きは、光量調節、遠近調節、感度調節、色彩調節の4つがある。これらの働きを理解させるために、まずは眼の構造（図1）についての知識を身につけさせた。ブタの眼球はヒトの眼球とほぼ構造が同じなので、知識を確認させるために「ブタの眼球解剖実験」を行った。生徒が実際に体験することで知識の定着を図った。また、今回のテーマに関係する視細胞の中でも錐体細胞（図2）の種類と働きは、色彩感覚に密接に関係しているので時間をかけて詳しく説明した。

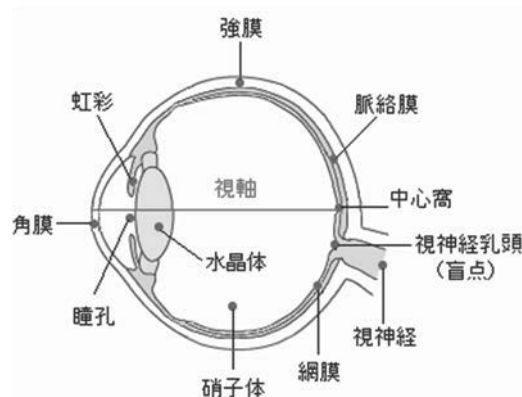


図1 ヒトの眼の構造

(2) 色とは何か？

色とは、物の性質ではなく、我々の眼が受容した光の波長別の強度情報をもとに脳が作り出す感覚である。個人差もあるが、我々は最大で360nm～830nmの範囲にある電磁波の波長を光（可視光）として認識することができる。波長の異なる光は色として知覚される。例えば、540nmの光は緑色、580nmは黄色、660nmは赤色として認識される。しかしながら、540nmの光と660nmの光を混ぜる

と黄色として認識されることから、我々の知覚は光の物理的な性質を区別しているのではない。

色を認識するのは、光源からの光を直接見る場合と光源からの光が物体に当たって反射された光を見る場合がある(図3)。光源を見ているときは、光源から出た光が直接眼に入るので光源から出る光が決まれば眼に見える光が決まる。例えば、660nmの光を出す光源は赤色に見える。一方、物体の色は太陽などの光源から届いた光のうち物体が吸収せずに反射した光の色である。光源が太陽の場合、例えば赤いリンゴは太陽光のうち青緑系の波長の光を吸収し、赤系の光を強く反射するので赤色に見える。赤いリンゴに青緑系の光のみを当てると反射する光がないのでリンゴは黒っぽく見える。

このように、我々が見ている物体の色は「光源の光」と「物体が吸収・反射する光」で決まる。いずれにしても、色の認識は“眼で直接モノを見る”のではなく、眼の網膜にある視細胞(錐体細胞)が光を捉え、視神経で神経の活動電位に変換され、大脳の視覚野へと情報が伝達されて“脳で色覚が成立する”のである。このことは生徒も非常に関心を示した。

(3) 知覚した色をどのように伝えるか?

我々が知覚した色を他人に伝える際には、自分の知覚した色を「色名」に置き換えて表現する。知覚した色に色名を当てはめるには、本来連続した無数の色合いを「赤」「緑」「青」などのカテゴリーに分類しなければならない。例えば、日本で青信号と呼んでいるものが欧米では「緑」と呼ばれたり、虹の色を表現するのに国によって異なったりするなど、カテゴリー化がその人の育った社会的背景によって変わり得る。しかしそれ以前に、その人の光の認識機構そのものに依存していることに注意すべきである。色認識の出発点である網膜において、光を神経の活動電位に変換する過程に多様性があるのであれば、色のカテゴリー化は必然的に多様化する。そのことを念頭に置かず他人と色についての情報交換を行うと、互いの情報が正しく伝わらない可能性がある。

3. なぜ色覚異常は男性に多いのか? -色覚のしくみ-

(1) 色覚異常について

日本人の男性の約5%(20人に1人)が、赤や緑の混じった特定の範囲の色について差を感じにくいという色覚特性を持っている。日本人女性でも約0.2%(500人に1人)が同様の色覚特性を持つ。これは日本全体では男性の約300万人、女性の約12万人に相当する。これは世界的に見ればAB型の血液型の頻度に匹敵するほど多い遺伝的多型であるが、その頻度の高さはあまり知られていない。

「色覚異常」または「色覚障害」とも呼ばれるこの色覚特性は、以前は「赤緑色盲」もしくは単に「色盲」ないし「色弱」と呼ばれていた。色盲といっても大半の色は判別することができるにもかかわらず

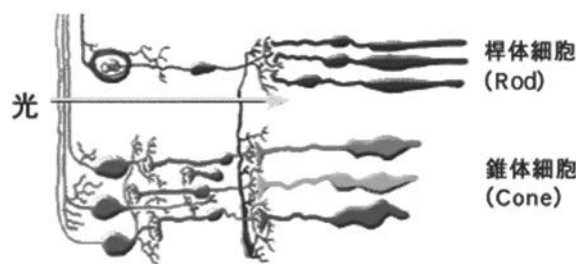


図2 網膜にある桿体細胞と錐体細胞

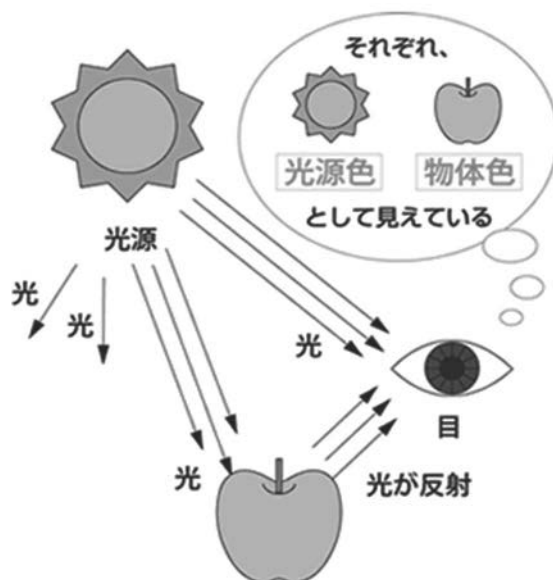


図3 色の見え方

ず、色覚の全盲であるという誤解を招きうるという懸念と、「色盲」という言葉が差別的ニュアンスで使われることがしばしばあったためである。だが、色覚「異常」や色覚「障害」という言葉は、色盲の人は「正常でない」「害を持っている」という差別的な価値判断を単語自体が含んでおり、「色盲」よりも差別的な表現だとも言える。また軽度の色盲という意味で「色弱」という表現も用いられることがあるが、「自分は色盲でなく色弱だ」と言って「自分は色盲のような障害者ではない」という差別意識の裏返しになっている場合も見受けられる。最近ではこのような人たちを「カラーブラインドネス」と呼んでいる。言葉の言い換えについては多くの議論が繰り返されてきたが、大切なのは言葉ではなく、その程度や質にかかわらず様々な色覚特性を持つ人がバリアフリーに暮らせる具体的な方策を提案することである。

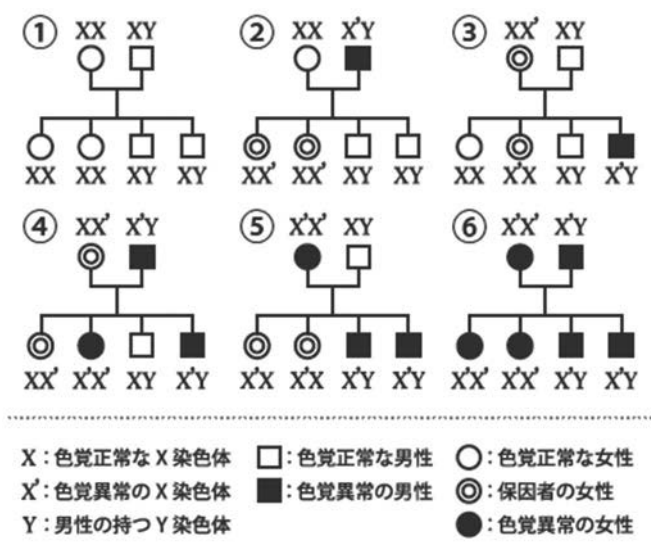
(2) 教科書に載っている家系図と問題点

教科書に記載されている伴性遺伝の例として、色覚異常の遺伝パターンを示す(図4)。赤緑色覚異常の遺伝子は劣性で、女性はホモ接合体にならないと説明されている。また、説明にはないが、赤緑色覚異常の男性と保因者の女性の間生まれた女兒は50%の確率で赤緑色覚異常になると認識されるような図(図4の④)をよく見かける。実際には50%ではないのである。

現行の教育課程になって伴性遺伝の内容は参考程度に縮小された。旧課程の教科書には確率的な記載もあったが、教育課程が変わっても赤緑色覚異常の家系図は多くの教科書に載っているため、教師自身が色覚異常の遺伝のしくみを理解しておくとともに、生徒に誤解されないように説明する必要がある。

(3) 網膜と視物質

網膜にある視細胞には、その形態から杆体 (rod) 細胞と錐体 (cone) 細胞がある。杆体細胞は弱い光に感受性があり、主に暗所で働き、色の区別はできない。主に明所で働く錐体細胞はそれぞれ種類の異なる視物質を含む3種類 (S、M、L 錐体) に分類される(図5)。S (Short) 錐体は青(吸収極大波長約420nm) 錐体、M (Middle) 錐体は緑(吸収極大波長約530nm) 錐体、L (Long) 錐体は赤(吸収極大波長約560nm) 錐体である。なお、赤錐体は、実際には吸収極大波長が赤というよりは黄緑に相当するが、最も長波長側に分光吸収特性を持つことから、便宜上「赤錐体」と呼ばれている。眼に入った光がどのような波長成分を有するかに応じて各視物質を介して各錐体が興奮する。各錐体の活動度の相対的な違いは脳に伝えられて処理され、色として知覚される。



* 1組の夫婦から男子(四角)が2人、女子(丸)が2人生まれたとすると、確率の上からは、父母の色覚の状態によって上記の6種類のパターンで色覚異常が遺伝します。

図4 ヒトの赤緑色覚異常の遺伝 (啓林館「生物」P149を一部改変)

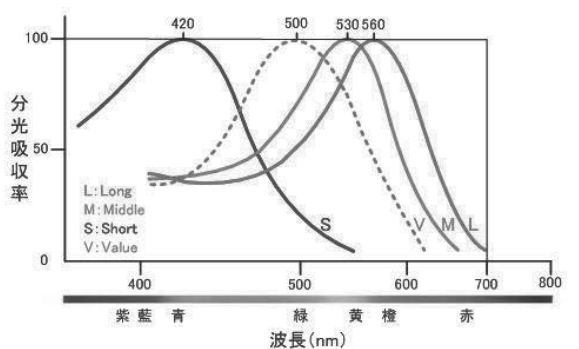


図5 3種類の錐体細胞

(4) 視物質遺伝子とその構造

視物質は、オプシン (opsin) と呼ばれる視物質タンパク質とビタミンA誘導体 (レチナール; retinal) の複合体である。視物質タンパク質は、杆体細胞に存在するロドプシン (rhodopsin)、青、緑、赤の各錐体に存在する青オプシン、緑オプシン、赤オプシンの4種類がある。このうちロドプシンと青オプシンをコードする遺伝子はそれぞれ常染色体 (第3、第7) に存在

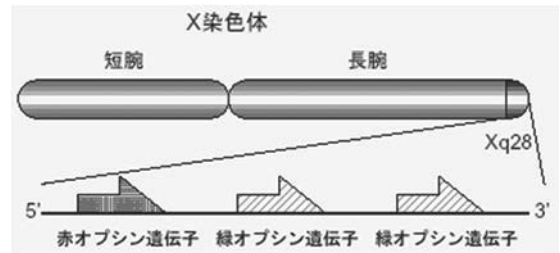


図6 X染色体上におけるオプシン遺伝子

している。一方、赤オプシンと緑オプシンをコードする遺伝子はどちらもX染色体の長腕 (Xq28) に存在し、赤オプシン遺伝子の下流に緑オプシン遺伝子が隣接して配置しており、赤オプシン遺伝子が1コピー、緑オプシン遺伝子が1～数コピー存在する (図6)。赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の構造は非常によく似ており、塩基配列レベルでの相同性は98%と非常に高い。

(5) ヒトの色覚と進化

授業では、以下のような「動物の色覚と進化」をテーマにヒトの色覚がどのように進化してきたかを考えさせた。

哺乳類以外の脊椎動物 (鳥類、爬虫類、両生類、魚類) は、錐体細胞の視物質を3または4種類有する3色型色覚もしくは4色型色覚を持つ動物が多く知られている。しかしながら、哺乳類の多くは2種類の錐体視物質しか持たず、2色型色覚である。哺乳類の祖先は夜行性の小型爬虫類であったとされているが、実際、哺乳類の視細胞の約95%が暗所に適応した杆体細胞であり、他の脊椎動物と比べて哺乳類の網膜には錐体細胞が少ない。ヒトにおいては杆体細胞が約1億5千万個あるのに対し、錐体細胞は約700万個しかない。ヒトにおいて赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の相同性が非常に高いことと、両者がX染色体上で隣接して配置していることは、この2つの遺伝子が進化の過程で遺伝子重複によって生じたとも考えられる。霊長類においても原猿類のキツネザルは2色型色覚であるが、我々ヒトやチンパンジーを含む狭鼻猿類は3色型色覚を有しており、霊長類の進化の過程を考慮すると約3,000万年前に3色型の色覚を獲得したと考えられている。よって我々の3色型色覚は、哺乳類以外の脊椎動物のものとは異なり、進化の過程で一度2色型色覚になったものから新たに3つ目の視物質を獲得して、再度成立したと考えられる。

ヒトがどのように2つの異なるオプシン遺伝子を獲得したのであろうか? もともとX染色体には1つのオプシン遺伝子しか存在しなかったが、そのうち集団中にオプシン遺伝子が2つに分離され、X染色体を2つ持つメスにおいてのみ3色型色覚の個体が出現したのではないか。樹上生活を営む上で3色型色覚を持つ個体は、緑色の葉の間に実っている赤や黄色の果実や黄緑色の若芽を見つけるのに都合がよく、生存に有利であったかもしれない。そのようなヘテロ接合体のメスにおいて相同染色体の組換えによる遺伝子重複が生じ、同一X染色体上に2つの異なるオプシン遺伝子が共存することになった。これによってオスも3色型色覚を獲得するようになり、それが集団中に広まったと考えられる。その後樹上から地上へ下り、狩猟農耕生活を送るようになったヒトでは、3色型色覚の優位性が失われ、淘汰圧が下がったため2色型色覚 (色覚異常と呼ばれる人) が再び増加しているのであろう。

(6) 色覚のしくみ

各オプシン遺伝子に変異が生じると、各視物質の遺伝子が発現しなくなったり、発現はしても視物質の分光吸収特性が大きく変化したりして、2色型色覚 (ここでは以下色盲とする) や異常3色型色覚 (以下色弱とする) になる (表1)。赤オプシン遺伝子の変異によるものを第1色盲、緑オプシン

遺伝子の変異によるものを第2色盲、青オプシン遺伝子の変異によるものを第3色盲と呼ぶ。日本人男性においては、第1色盲が約1.5%、第2色盲が約3.5%、第3色盲が約0.001%存在するらしい。赤と緑の視物質は吸収スペクトルの重複が大きいので、どちらが異常になっても似た症状になる。これらは赤～緑の波長域で色の差を感じにくくなるため「赤緑色盲」と総称される。これに対し第3色盲は、黄色～青の波長域で色の差を感じにくくなるため「青黄色盲」と呼ばれる。原因遺伝子が常染色体

色覚タイプの分類		1型	2型	3型
対応する錐体 (比率)		L錐体 (25%)	M錐体 (75%)	S錐体 (0.02%)
三色覚 (色弱)	いずれか一種の錐体の感度が低い	1型三色覚 (第一色弱)	2型三色覚 (第二色弱)	3型三色覚 (第三色弱)
二色覚 (色盲)	いずれか一種の錐体の感度が極めて低い (or 欠落)	1型二色覚 (第一色盲)	2型二色覚 (第二色盲)	3型二色覚 (第三色盲)
一色覚 (全色盲)	いずれか一種の錐体のみが機能	(L、M、またはS) 錐体一色覚		
	杆体のみが機能	杆体一色覚		

錐体を何種持っているか

表1 各錐体の異常による色覚

に存在し、劣性遺伝でホモ接合体しか表現型を生じない第3色盲はその頻度が数万人に1人であるのに比べて、ホモ接合体が大部分を占める女性の赤緑色盲の頻度は500人に1人と著しく高い。赤緑色盲のほとんどは、赤および緑オプシン遺伝子間の相同性の高さで2つの遺伝子が隣接して配置していることから生じる不等交叉による相同染色体の組換え（以下、相同組換えと呼ぶ）によるものである。

X染色体の緑オプシン遺伝子の数には個人差があり、日本人は1つ持つ人と2つ持つ人がそれぞれ40%、3つ以上持つ人が約20%いるらしい。各錐体において発現するオプシン遺伝子は1つであるが、オプシン遺伝子座に並ぶいくつかの遺伝子のうち、発現するのは上流の2つのうちのどちらかであり、3番目以降が発現することはない（図7）。したがって、通常は（正常な場合）、最初の赤オプシンか、その後ろの緑オプシンのどちらかが発現することになる。この遺伝子座で不等交叉による染色体間の相同組換えが起こると、①遺伝子欠失、②遺伝子重複、③赤オプシンと緑オプシンのハイブリッド遺伝子の形成、などの異常が生じる。図7Aのような相同組換えが生じると、一方の染色体では赤オプシン遺伝子が欠失し、最初の2つの遺伝子がどちらも緑オプシン遺伝子になってしまう。このようなX染色体を持つ人（男性）は赤錐体を作ることができず、緑錐体と青錐体しか持たないので2色型色覚となり、強度の第1色盲になる。もう一方のX染色体では、赤オプシン遺伝子が重複し、最初の2つの遺伝子がどちらも赤オプシン遺伝子になってしまう。このようなX染色体を持つ人（男性）は、赤錐体と青錐体の2色型色覚となり、強度の第2色盲になる。欠失や重複は図7Bのように2番目以降のオプシン遺伝子にも起こる。緑オプシンの数に1～数コピーと個人差があることは、この遺伝子座が長い年月の間に相同組換えを頻繁に起こしてきたことを示している。多くの人は緑オプシン遺伝子を複数持っているので、2番目の緑オプシン遺伝子が欠失しても3番目が2番目の位置に繰り上がるだけで色盲の表現型は示さない。ただし、緑オプシンを1つしか持たない人にこの欠失変異が起こると、この遺伝子座から緑オプシン遺伝子が失われ、赤オプシン遺伝子1つだけしか存在しないタイプの第2色盲になる。2番目の緑オプシン遺伝子が重複する場合は、3番目以降の緑オプシンは実際には発現することはないので、表現型には関係しない。このような2番目以降の遺伝子の欠失や重複は1番目の欠失や重複と同等の頻度で起きていると考えられるが、表現型としては色盲にならないのである。なお、相同組換えは、図7Cのように遺伝子単位で起こるだけでなく、遺伝子の中間で起こることもある。ハイブリッド遺伝子の話は非常に興味を示した生徒もいたが、授業ではこれ以上の

詳しい説明は大学レベルの専門的な内容となるので、多くの生徒は理解の妨げになると判断して省略した。

(7) 女性で赤緑色盲が少ない理由

常染色体にある変異遺伝子の場合と赤緑色盲のようにX染色体にある変異遺伝子の場合では、ヘテロ接合体で表現型が現れず劣性遺伝になるしくみが大きく異なるが、しばしば見過ごされている。

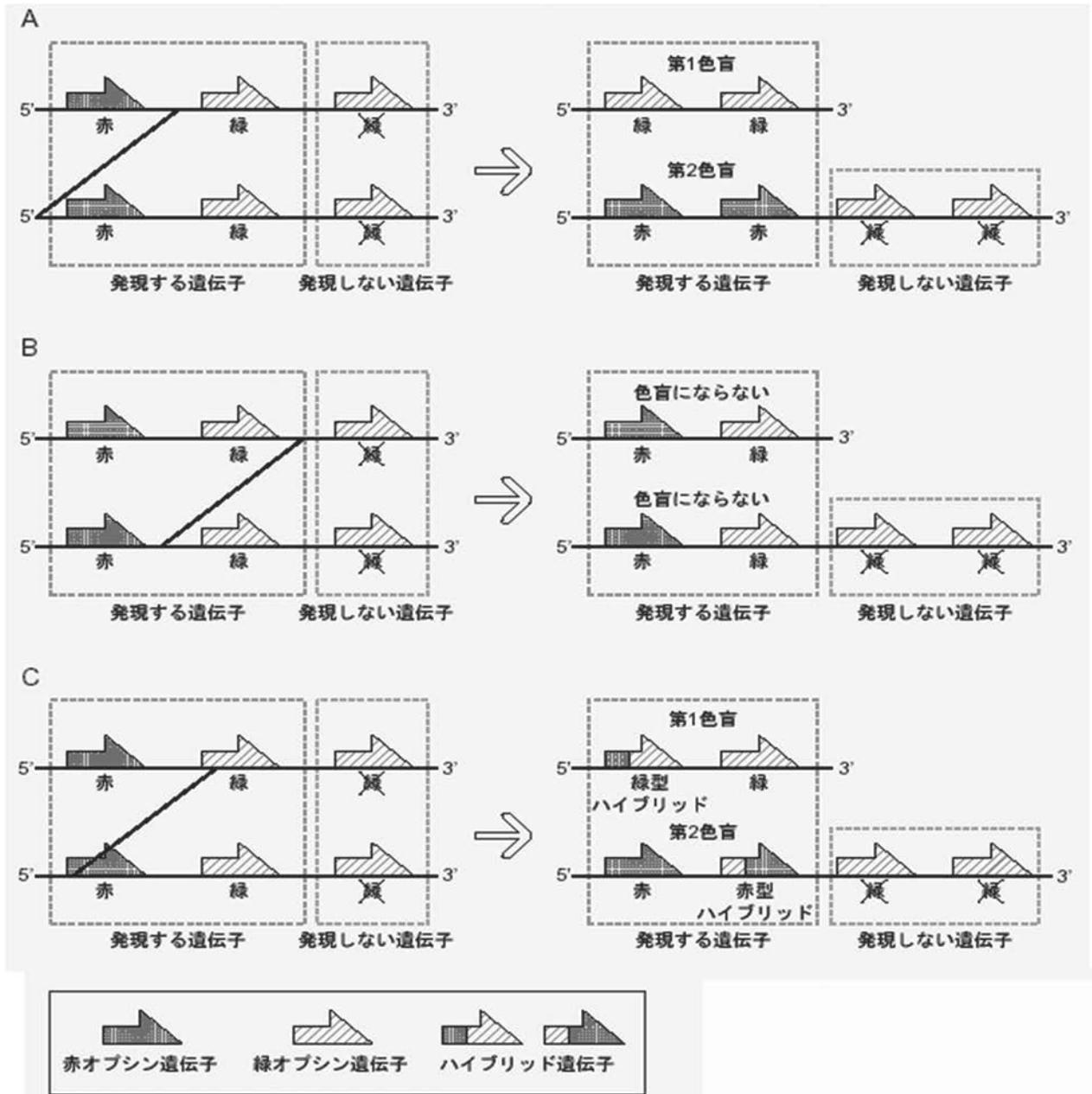


図7 X染色体上で発現するオプシン遺伝子と発現しないオプシン遺伝子

遺伝子の発現において、常染色体では、2本の染色体にある対立遺伝子の両方が細胞内で同時に発現している。したがって、その一方が変異を有していても、(変異遺伝子が劣性であれば)細胞には常に正常な遺伝子が発現し、すべての細胞において機能が補われることになる。しかしX染色体は、男性では1本、女性では2本と本数が異なるので、そのままでは発現量に2倍の差が生じてしまう。そこで、女性の身体を構成する各細胞では、どちらか一方のX染色体が不活性化され、常に1本の染色体の遺伝子しか発現しないように調整されている。2本あるX染色体のどちらを不活性化させるか

は発生の過程でランダムに決まる。したがって、X染色体上の毛色遺伝子で決まる三毛猫の縞模様と同じように、女性の身体はX染色体上の遺伝子発現に関してモザイクになっている（図8）。対立遺伝子の一方が変異型の場合は、他方の染色体の遺伝子によって機能が補われることはなく、個々の細胞レベルでは正常型か変異型のどちらかになる。すなわち、伴性劣性遺伝という概念は個体レベルでは成立するが、細胞レベルでは成立しないのである。

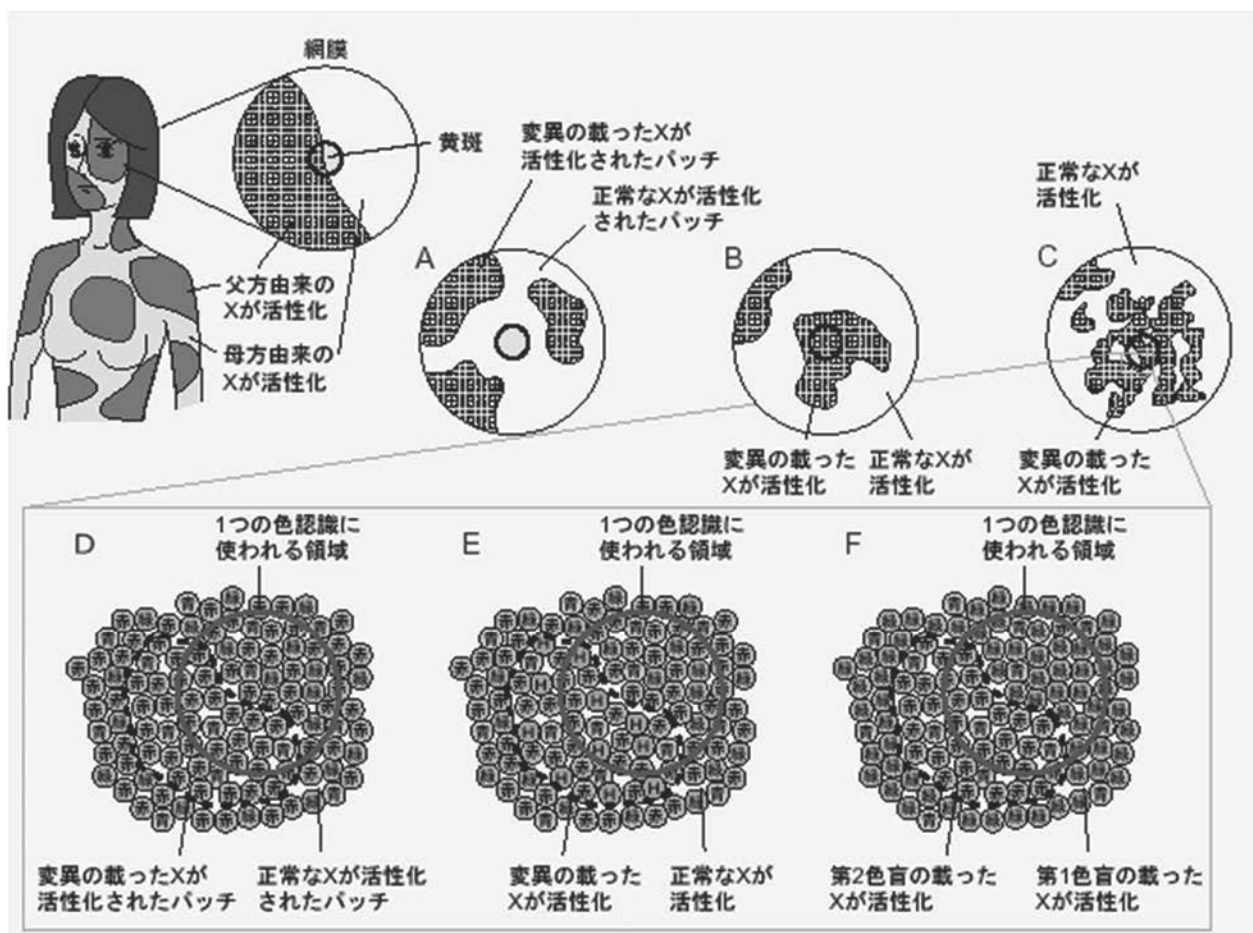


図8 女性の身体と網膜におけるX染色体の発現による違い

網膜においても、それぞれの錐体細胞では一方のX染色体が不活性化されている。したがって、赤緑色盲変異のヘテロ接合体女性（保因者）では、正常染色体か変異の生じている染色体のどちらか一方が活性化された細胞群が、網膜上に平均50%ずつの割合でモザイク状に配列していると考えられる。保因者の頻度は日本人女性の約10%で、視細胞の半分は変異を持っているのであるから、単純に考えれば約5%は色盲になってもよさそうである。しかし実際には赤緑色盲の女性は約0.2%しかおらず、しかもその大半はホモ接合体である。ヘテロ接合体の女性は視細胞の半分で赤緑色盲の変異があるX染色体が活性化しているにもかかわらず、ほとんどの人は赤緑色盲の表現型を示さない。これはなぜだろうか？その理由について、図8を踏まえて以下に3つ（①～③）述べる。

①変異のある遺伝子を含む染色体が活性化された細胞群が、網膜上に大きな集団（以下パッチと呼ぶ）をつくるにしても、それが網膜のどこの部分に分布するかによって色覚への影響が異なることである。色を認識するときは眼を動かして対象物を視野の中心にもってくるので、たとえ変異のある染色体が活性化された細胞群が、大きなパッチを形成して視野の周辺部に存在しても色覚には影響しない。そのようなパッチが視野の中心をなす黄斑部にある場合のみ色盲の表現型となる。

②変異のある染色体が活性化された細胞群が、比較的小さなパッチとして正常型の染色体が活性化された細胞群のパッチと入り混じって存在する場合には、たとえそれが網膜の黄斑部であっても色盲の表現型が表れにくい。眼は常に細かく動きながら物体を捉えており、多数の錐体細胞からの情報を統合して色を判断するので、パッチが入り混じった状態では実質的には3種の錐体細胞の比率が偏っているだけとなる。なお、ハイブリッド型の視物質を持つヘテロ接合体の女性は、赤錐体と緑錐体以外のその中間型の特性を持つ視物質を発現する錐体が生じるので、網膜上には分光吸収特性の異なる錐体細胞が通常の女性よりも1つ多い4種類存在することになる。男性よりも女性の方が色覚に関してバラエティーに富み、世界がよりカラフルに見えていることだろう。

③色認識には左右の眼からの情報が統合され脳で認識される。変異のある染色体が活性化された細胞群が大きなパッチとして、両眼の視野の中心に同時に分布しない限り赤緑色盲にはならないのである。女性で片方の眼だけが色盲になっている人は存在するが、このような人は片眼ずつ調べて初めて色盲の表現型が出るのであって、通常の色覚検査では色盲と判定されない。このような人は、左右の眼で色の見え方が違うと感ずることがある。

4. 色覚異常と授業への配慮

(1) 色覚異常の人が見る世界

正常な色覚の人は、可視光のいろいろな波長の光を色として弁別できる。しかし、赤～緑、青～紫など明度が類似した色の見分けは一般に困難である。また、「水色とピンク」「灰色と薄い水色」など彩度の低い色ではさらに弁別が難しくなる。薄暗い場所では特に色の弁別が困難なことが多い。白や水色のシャツと薄いピンク色のシャツに困難を感じたり、薄暗い飲食店のトイレの男女別が水色とピンク色の同じ形の標識で示されていると、この2色が弁別できなかつたりすることがある。

我々の日常生活の中で、赤と緑を弁別できることを前提とした表示や掲示が多く見受けられる。例えば、スキー場のゲレンデ案内板、電源アダプターのパイロットランプ、駅のホームにある発車時間を表示する電光掲示板などである。一方で、同じ赤と緑の光の組合せでも交通信号機は、赤緑色盲の人でも赤と緑（青信号）を区別できるようになっている。電気製品の緑のLEDに比較して、交通信号機では青錐体を刺激する、より短波長側の緑を使用することが決められている。赤と緑のLED表示も、緑にこのような短波長側の緑を使えば色盲の人にも理解しやすくなるはずである。

色の弁別能力の低下は、より多くの錐体細胞からの情報を集めることで、ある程度補うことができる。したがって、広い面積に塗られた色は比較的容易に認識することができるのに対し、小さな図形や細い点は見落としやすい。例えば、間近で見るスポーツカーが赤色であることは容易に気づくが、緑色の葉の中に赤い葉が混じる紅葉には気づかないことが多い。またマジックのように太く書かれた赤線の色はわかるが、ボールペンで書かれた細い赤線は黒と見分けがつかない。

第1色盲では、可視光領域が長波長側で狭くなっている。したがって赤色の感度が非常に低い。この人たちにとって、赤は明るい鮮やかな色ではなく、暗い地味な色である。長波長の濃い赤はほとんど黒に見える。PowerPoint やカラースライドで黒や紺、濃い青色の背景に「濃い赤」の文字があると、文字が目立たないどころか読むことさえできない。学会でスライドを指し示すのによく使われる赤いレーザーポインターも非常に見にくい。電光掲示板の赤と緑の文字は、第2色盲の人にはほとんど同じ色に見えるが、第1色盲の人にはほぼ同系色で赤だけが暗く沈んで見える。たいていの場合、重要な情報が赤で表示されているので、重要な情報ほど読み取りにくいということになる。

(2) 講義や授業に際して注意すべき点

(a) クラスには必ず色覚異常者の児童・生徒がいる

先天赤緑色盲は、男性20人につき1人は存在する。男女半々の40人学級では、各クラスに1人は色覚異常の児童・生徒がいるという勘定になる。したがって、本来はすべてのクラスで色覚バリアフリーな授業をすることが必要であるが、現状では教師が意識して授業を行っているとは思えない。黒板でも赤いチョークで書かれている文字や図をよく見かける。

従来は学校検診において、一斉に色覚検査が行われてきた。教師はどの児童・生徒が色覚異常者であるかを検査によって把握することで、そのような児童・生徒がいるクラスでは色覚バリアフリーを心がけるという建前になっていた。だが実際は検査によって色覚異常者と判定された児童・生徒に一方的に対応を強いることになりがちで、色覚検査が授業の色覚バリアフリーではなく、進路の制限など差別助長の一端となってきた。そのため、現在では学校での一斉検査は実施されていない。したがって我々教師は、クラスに必ず色覚異常の生徒がいることを前提として色覚バリアフリーな授業を行う責務が生じてきた。今回の授業では「石原式色覚検査表」を演示で見せた。また、実際に色覚異常者の立場で考えてほしいために、色覚異常者がどのように物が見えているかを「カラーユニバーサルデザイン」(NPO 法人) という本で紹介した。

(b) 黒板の板書に関して

黒板の板書では、白いチョークは問題にならないが、明度の低いカラーチョークでは、緑の黒板の色とチョークの色の色相の差をあまり感じられない色覚異常者にとっては見やすさが大きく悪化する。したがって、カラーチョークを使う際は、明度の低い赤、青、緑はなるべく避け、明度の高い黄色のチョークを優先して使うのが望ましい。特に赤チョークで板書された文字は、赤緑色盲の人にはほとんど読めないことがある。最近では、この対策として朱色のチョークが「色覚異常対応カラーチョーク」として販売されるようになった。板書に際しての注意点をまとめると、①主に白や黄色のチョークを用いる。②強調のために赤チョークを使用することは避ける。やむを得ず赤チョークを使用するときは、朱色を使い、別の色で下線や囲みをつける。③文字や図などはできるかぎり大きくはっきりと書く。④図を描いて色分けする場合は、文字や記号を併記する。色の境界線は白チョークを用いて区別をはっきりする。⑤カラーチョークを使用する場合は、色名をはっきり告げるようにする、などである。

(c) 色の名前に関する注意点

色覚異常者の多くは、色を言い間違えて周囲に当惑された経験を持つ。これが私的な会話ならまだよいが、授業中に先生に指名されて色名を答えさせられ、それが間違いだと直された場合、児童や生徒の心に与える傷は大きい。このようなことがいじめのきっかけになることも少なくない。この児童・生徒に対しても、特に大勢の前では色名を尋ねることは絶対に避けるべきである。また、例えば、保育園や幼稚園で園児に作業させる場合、「○○色のクレヨンを取って」のように色だけで対象物を指定すると、色覚異常の園児は間違える可能性が高い。このような場合は、「右から2番目の長い○○色のクレヨンを取って」のように、場所や形も指定するように心がける必要がある。

5. まとめ

ヒトの眼に関する授業では、おもに視覚と色覚について学習する。ここでは色覚について、単に色の見え方のしくみを教えるだけでなく、遺伝子レベルでの色の見え方、色覚異常の発現の仕方、などをモデルや検査表、ガイドブックなどを使って授業に取り入れた。赤と緑の色を識別する2つのオプ

シン遺伝子はX染色体上にあり、ヒトの進化とともに色覚も変化してきたことや、変異遺伝子は劣性であるので赤緑色盲の人は男性に多いこと、染色体の不等交叉によりいろいろな色覚異常が起こること、教科書に載っている伴性遺伝が実際には異なることを理解させた。教師が黒板での板書やプロジェクターなどでスライドを使って授業を行う場合、色覚異常者に配慮するバリアフリーな授業を常に念頭に置く必要がある。大学では各種研究会や卒論の発表などでPowerPointを使うことが多い。文字や図、背景の色には十分に注意して作成するように心がけたい。

6. おわりに

本研究では、この単元の終わりに授業の理解度に関する事後アンケートのみ実施した。医療や生物系への進学を志望する生徒も多いので、色覚のしくみを様々な角度から説明し、色覚バリアフリーについても紹介した。視覚と色覚に関しておおむね理解できたと答える生徒が多く、特に色覚バリアフリーについては大半の生徒が強い関心を示した。事前アンケートも実施することで、生徒がこの単元でどの程度知識が身に付き、理解が深まったか、などをより詳しく分析・検証することができたであろう。また、色覚バリアフリーについては、グループ学習や討論などを取り入れると、最近のキーワードであるアクティブラーニングに近い授業が展開できるのではないかと思う。

7. 参考文献

- 1) 本川達雄、谷本英一編『生物』（文部省検定教科書）、啓林館、P149ほか、2012
- 2) 岸昌洋『実践色のユニバーサルデザイン』、ビジネスに役立つコラム、2014
- 3) カラーユニバーサルデザイン機構（NPO 法人）『CUD』、ハート出版、2009
- 4) 市川宏ほか『SPP 標準色覚検査表（検診用）』、医学書院、1993
- 5) 市川一夫『知られざる色覚異常の真実』、幻冬舎、2015
- 6) 岡部正隆、伊藤啓『色覚の多様性』、細胞工学、Vol.21、No 9、2002