

まえがき

「コップの水は透明なのに湖の色はなぜ青く見えるか?」「シャボン玉はなぜ虹色に見えるか?」「花火の色はどのように作るか?」「赤いリンゴはなぜ赤く見えるか?」「秋になるとなぜ紅葉するか?」などと問われたら、私たちは何と答えるでしょうか?

これらは、いずれも色と光が関与する問題です。本書は、このような日常のちょっとした疑問や普段何気なく見過ごしている問題を、科学の眼で見ることを意図して書いたものです。ところが、日常の身近な現象は、簡単なようで、説明が困難である場合が多いようです。本書は、そのような現象に対する説明をなるべくわかりやすく、高校生程度（一部、大学教養程度）の知識でわかるように、なおかつなるべく原理にまで遡って解説することを試みました。

私たちは柿の実が熟したかどうかを色で判断するし、人の顔色を見て感情の変化や健康状態を読み取ろうとします。このように色を読み取ることが生きることに直結していたため、私たちの祖先は色覚を発達させました。

ニュートンは「光線に色はない」と言いました。これは光に色があるのではなく、人間の脳が光の情報をそのように判断しているという意味です。テレビでは光の3原色である赤緑青の光を使ってあらゆる色を表現しています。例えば、赤と緑の光を混ぜると黄色になります。一方、道路のトンネルなどに使われているナトリウムランプは黄色の光を出しています。赤と緑の光の混合とナトリウムランプの黄色光とは物理的に同じ光ではありません。この両者が同じ黄色に見えるのは、光の情報を処理した私たちの脳がそのように判断しているからです。

色の見え方には個人差があり、過去の経験や社会的文化的側面にも影響されます。また、私たちは色から心理的、生理的影響を受けています。赤や橙色には暖かさを感じ、青には冷たさを感じます。明度や彩度が高い色は陽気な感じになり、それらが低いと陰気な感じになります。

「赤いネオンサイン」も「赤いリンゴ」も私たちの眼には赤く見えます。しかし、ネオンサインは暗闇でも輝いていますが、赤いリンゴは暗闇ではほとんど色は見えません。ネオンサインは自ら赤い光を出しているので暗闇でも赤く見えます。赤いリンゴは太陽の光か蛍光灯などの白色光が当たっていると、リンゴの皮に含まれる

アントシアニンという物質が青緑の光を吸収し、その反射光は青緑が欠けた光となり私たちの眼に入るので赤く見えます。このように、私たちが見ている色は光そのものの色を見ている場合と物体に光が当たって反射した色を見ている場合とがあります。また、同じ青でもコバルトブルーの青と南米に生息するモルフォチョウの羽の青の原因は違います。コバルトブルーは顔料の一種で赤色の光を吸収するので青く見えます。モルフォチョウは色素を持つのではなく、羽に鱗粉が敷き詰められ、鱗粉にはリッジという多層の柵構造があり、多層膜構造による光の干渉によってみごとな青色に見えます。このように色素によって色が着く場合と光の干渉などによる構造色とがあります。

宝石の価値は、透明度、色の輝き、光の反射のぐあい、希少かどうかなどによって決まります。宝石は単に色が美しいだけでなく、強い表面反射や大きい屈折率による干渉色によって色の輝きが増します。本書では、宝石の色の原因やその種類による色の付き方の違いについて述べます。

私たちは紙や衣類などに色を着けたいときは、染料か顔料を使います。染料は分子として、顔料は粒子として着色します。日本画や油絵は顔料、インクや食紅などは染料を使用します。染料と顔料による色の違い、色を呈する原理の違い、色持ちの良さなどについて述べます。

私たちは光源として白熱電球、蛍光灯、LED 照明、ナトリウム灯、水銀灯などを使います。それぞれの発光原理、特徴、効率、使われ方などについて述べます。最近、光を用いた新しい技術が各方面で応用されています。光触媒を用いた汚れを自然に除去する窓ガラスや壁、曇らない鏡、空気浄化装置、医学への応用について述べます。また、光ファイバー通信やファイバースコープの仕組みについても述べます。

動物は食物としての獲物、捕食者、交尾の相手を色によって認識しています。色の認識は動物の生存に直結しています。動物の色の認識の仕方、魚の色の変化、ホタル、ウミホタル、ホタルイカの光る方法などについて述べます。

植物は季節によって若葉の黄緑色から緑へそして秋の赤または黄と変化します。花には多様な色があり季節や時間帯によってさまざまに変化します。葉の色変化の理由、アジサイやアサガオの花の色の变化の仕組み、海藻がいろいろな色を持つ理由について述べます。

本書は疑問形で書かれた問題に関して解説されていますが、はじめから順に読み進めてもよいし、関心がある話題について拾い読みしてもよいようになっています。

したがって、どこから読み進めても結構です。また、解説の終わりには「まとめ」が数行で書かれています。疑問形で書かれた問題に関する回答を自分で考えて「まとめ」を読んで比較するのもよいし、解説を読んで自分が理解した内容を「まとめ」と比較してみるのもよいかも知れません。

若者の読書離れ、理科離れが言われる今日、日常の何気ない現象に目を留め、「なぜ？」という疑問を持つこと、そして子どもが発信してくる疑問に大人が答えることができることが求められます。その答え方しだいで子どもたちは自然や身近で経験する現象に対する関心を深め、好奇心を広げ、世界の広がりとお深さを感じるに違いありません。

「科学の眼で見る日常の疑問」という視点は、筆者が転職して千葉大学教育学部に勤務しはじめた当初から教員を目指す学生に求めた視点でした。当時の稲場研究室に属した学生諸君の一部には卒論でも自ら疑問を見出し、それについて調べて発表してもらいました。本書を出版することができたのは、当時の研究室での議論での問題意識が基礎になっています。当時の共同研究者であり現在千葉大学教育学部准教授の林英子さんおよび当時の学生諸君に感謝したいと思います。

本書の出版を認めてくださった技報堂出版（株）編集部長の石井洋平氏および直接編集に携わってくださり有益な助言をいただいた同社編集部の伊藤大樹氏に深く感謝したいと思います。

本書は、筆者の孫である三浦隆明君^{たかあき}および稲場咲樹美ちゃん^{さきみ}に捧げたいと思います。隆明君は中学2年生、咲樹美ちゃんは4才ですが、二人を日本の将来を担い、21世紀後半を生きるであろう少年少女の代表とさせていただきたいと思います。隆明君は昨年『空気のはなし』と『エネルギーのはなし』の本を出したときに、難しい用語は事典で調べるなどして2冊とも通読してくれました。本書は「空気のはなし」よりはかなり難しい内容も一部ありますが、隆明君がどこまで読めるか楽しみです。

2017年7月

稲場 秀明

《 iv 》

《著者紹介》

稲場 秀明（いなば・ひであき）

1942 年 富山県生まれ
1965 年 横浜国立大学工学部応用化学科卒業
1967 年 東京大学工学系大学院工業化学専門課程修士修了
同 年 プリヂストンタイヤ（株）入社
1970 年～ 名古屋大学工学部原子核工学科助手，助教授を経る
1986 年 川崎製鉄（株）ハイク研究所および技術研究所主任研究員
1997 年 千葉大学教育学部教授
2007 年 千葉大学教育学部定年退職

工学博士

主な著書

エネルギーのはなし—科学の眼で見る日常の疑問，技報堂出版，2016
空気のはなし—科学の眼で見る日常の疑問，技報堂出版，2016
氷はなぜ水に浮かぶのか—科学の眼で見る日常の疑問，丸善，1998
携帯電話でなぜ話せるのか—科学の眼で見る日常の疑問，丸善，1999
大学は出会いの場—インターネットによる教授のメッセージと学生の反響，
大学教育出版，2003
反原発か，増原発か，脱原発か—日本のエネルギー問題の解決に向けて，
大学教育出版，2013

趣味はテニスと囲碁

千葉市花見川区在住

目 次

第1章 光 1

- 1 話 光は波か粒子か？ ----- 2
- 2 話 光の速度はどのように測るか？ ----- 4
- 3 話 池に落ちたゴルフボールはなぜ浅くに見えるか？ ----- 6
- 4 話 鏡でなぜ像が見えるか？ ----- 8
- 5 話 私たちはなぜ可視光線しか見えないか？ ----- 10
- 6 話 赤外線とはどんな光か？ ----- 12
- 7 話 紫外線とはどんな光か？ ----- 14

第2章 色の見え方 17

- 8 話 光の3原色とは？ ----- 18
- 9 話 色の3原色とは？ ----- 20
- 10 話 眼の仕組みと視細胞の働きは？ ----- 22
- 11 話 光を感じる仕組みは？ ----- 25
- 12 話 色を感じる仕組みと視覚を伝える神経伝達？ ----- 27
- 13 話 色の知覚は客観的なものか？ ----- 30
- 14 話 色は人の心の動きにどのような影響を与えるか？ ----- 33
- コラム 色の表現 ----- 36

第3章 水と色 37

- 15 話 コップの水は透明なのに海や湖の色はなぜ青いか？ ----- 38
- 16 話 海や湖の色は何で決まるか？ ----- 40
- 17 話 ホースで水をまいて虹を作れるか？ ----- 42
- 18 話 シャボン玉が虹色に見えるのはなぜか？ ----- 44
- コラム 白浜が海水に濡れるとなぜ黒っぽくみえるか ----- 46

第4章 宝石の色 47

- 19 話 ダイヤモンドにはなぜ透明なものと色がついたものがあるか？ ----- 48
- 20 話 サファイアの色の原因は？ ----- 50

21 話 ルビーの色の原因は？ ----- 52

22 話 水晶の色の原因は？ ----- 54

第5章 色素と染料

57

23 話 色素と染料と顔料は何が違うか？ ----- 58

24 話 天然の染料はどのように染めるか？ ----- 60

25 話 染料はどのように繊維に着いて色を出すか？ ----- 62

26 話 染料が色を出す理由は？ ----- 65

27 話 漂白でなぜ色が白くなるか？ ----- 67

第6章 顔 料

69

28 話 顔料とはどのようなものか？ ----- 70

29 話 無機顔料はどのようにして色が出るか？ ----- 72

30 話 有機顔料の特徴は？ ----- 74

31 話 化粧品用の顔料はどのように用いられるか？ ----- 76

32 話 プラスチックはどのように着色されるか？ ----- 79

33 話 カラープリンター用インクで染料と顔料では何が違うか？ ----- 81

第7章 発 光

83

34 話 白熱電球の光はなぜ赤みがかって見えるか？ ----- 84

35 話 蛍光灯はどのように光るか？ ----- 86

36 話 水銀灯やナトリウム灯はどのように光るか？ ----- 88

37 話 花火の色はどのようにして作るか？ ----- 91

38 話 発光ダイオードはどのように光るか？ ----- 93

39 話 発光ダイオードはどのように利用されるか？ ----- 95

40 話 レーザー光線はどんな光か？ ----- 98

41 話 犯罪捜査に使われるルミノール反応とは？ ----- 101

第8章 光を利用した技術

103

42 話 光触媒の原理と仕組みは？ ----- 104

43 話 光触媒はなぜ壁や窓ガラスなどの汚れを除去できるか？ ----- 106

44 話 光触媒はなぜ防臭や空気浄化に使えるか？ ----- 108

- 45 話 なぜ光触媒で曇らない鏡ができるか？ ----- 110
46 話 光触媒はなぜ医療にも使えるか？ ----- 112
47 話 光は真っ直ぐ進むのに
曲がった光ファイバーでなぜ通信できるか？ ----- 114
48 話 ファイバースコープの仕組みは？ ----- 116

第9章 食品と色

119

- 49 話 果実は熟するとなぜ色づくか？ ----- 120
50 話 赤ワインなどに含まれるポリフェノールは健康によいか？ ----- 122
51 話 食肉は色でどのように評価されるか？ ----- 124
52 話 白身魚と赤身魚は何が違うか？ ----- 126
コラム 食品の着色料 ----- 128

第10章 暮らしと色

129

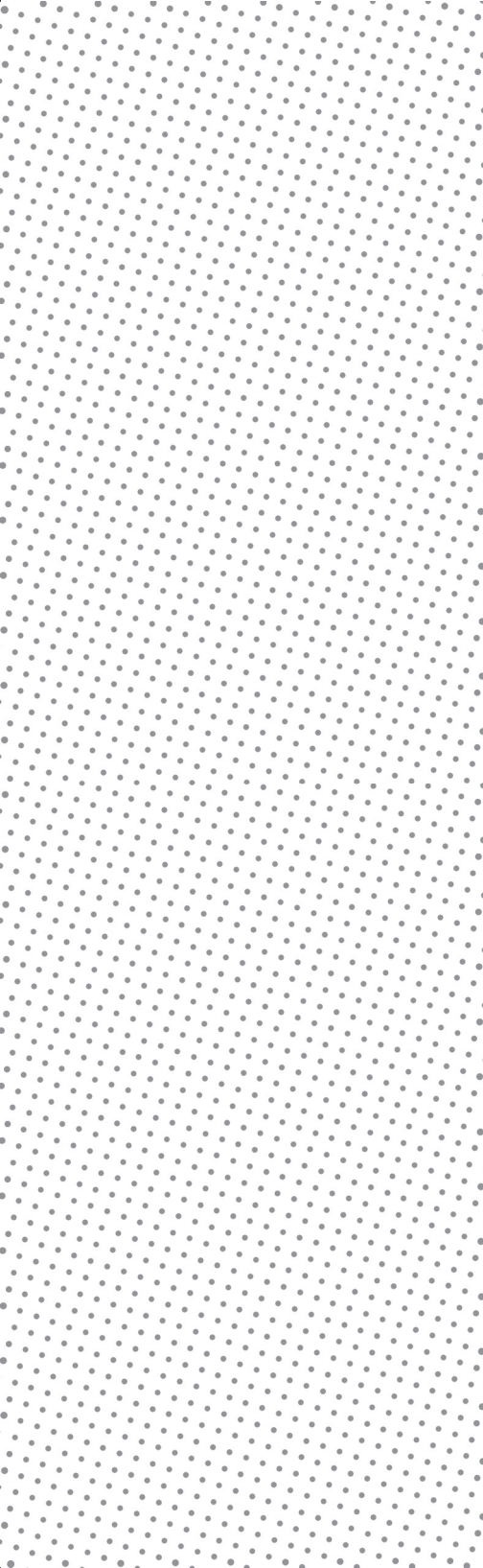
- 53 話 鉛筆でなぜ字が書けるか？ ----- 130
54 話 ボールペンでなぜ字が書けるか？ ----- 133
55 話 液晶カラーテレビの仕組みは？ ----- 136
56 話 デジタルカメラの仕組みは？ ----- 138
57 話 光で色が変わる調光ガラスとは？ ----- 141
コラム ガスコンロにみそ汁をこぼしたときの発色 ----- 144

第11章 動物と色と光

145

- 58 話 動物は色をどのように認識しているか？ ----- 146
59 話 魚の色は何によるか？ ----- 149
60 話 魚の色はどのように変化するか？ ----- 151
61 話 ホタルはどのように光るか？ ----- 154
62 話 ウミホタルとホタルイカはどのように光るか？ ----- 156
63 話 モルフォチョウはなぜ鮮やかな青色か？ ----- 158
64 話 動物の体の色はどのように形成されるか？ ----- 160
コラム 昆虫の視力と色覚 ----- 162

- 65 話 黄緑色の若葉はなぜ日々緑色が濃くなるか？ ----- 164
- 66 話 秋になるとなぜ植物は紅葉または黄葉するか？ ----- 166
- 67 話 花にはなぜさまざまな色があるか？ ----- 169
- 68 話 アジサイの花はなぜ変化するか？ ----- 171
- 69 話 アサガオの花の色はどのように変化するか？ ----- 173
- 70 話 陸上植物は緑色なのに海藻はなぜいろいろな色を持っているか？ ----- 175
- コラム 白い花と大根の色 ----- 178



第 1 章

光

光には波としての性質があるため、鏡で後ろのものが見えたり、池に落ちたゴルフボールが浅く見えたり、シャボン玉が虹色に見えたりする。眼に見える光だけでなく、眼に見えない光もある。この章では、光の粒子としての性質、光速の測り方、私たちはなぜ可視光線しか見えないのか、眼に見えない赤外線や紫外線についても述べる。

1 話 光は波か粒子か？

光は波か粒子かについて歴史的に長く議論されてきた。17 世紀にニュートンは太陽の光がまっすぐに進んでくことから粒子だと唱えていた。その後、グリマルディは光の回折現象を発見、フレネルは光の波は波長が極めて短い波だとの考えに基づいて、光の干渉、反射、屈折について物理法則を打ち出した。19 世紀には、ヤングが干渉縞から光の波長を計算し、波長が $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下だという値を得た。ここで、光の粒子説はしばみ、波動説が有力となった。さらに、マクスウェルは「光は波で電磁波の一種である」と予言し、磁場と電場は表裏一体とする電磁気理論やマクスウェルの方程式を提出した。こうして、光の研究に可視光以外の「電磁波」の概念が持ち込まれることになった。そういう流れの中で「光は粒子である」という説は姿を消した。

ところが 20 世紀に入ってアインシュタインによる光電効果の実験によって、光は粒子の性質も持つことが分かった。金属に光を当てると表面から電子が出てくる現象は光が粒子であると考えないと説明ができない。さらに、電子線回折が予言され、実験により確かめられると、電子も粒子性のほかに波動性も持つことが明らかとなった。アインシュタインの光量子論のポイントは、光のエネルギーは光の振動数（振動数＝光速÷波長）に関係すると思ったことである。そして、

$$E = h\nu \quad (1)$$

という式を導出した。ここで、 E は光のエネルギー、 h はプランク定数、 ν は光の振動数である。アインシュタインは、光電効果の実験から求めたプランク定数と、プランクが電磁波の研究から求めた定数がピッタリと一致することを見出した。式 (1) で、光の波としての性質、振動数が光の粒子としての性質、エネルギーと深く関係している姿が現れている。つまり「波でもあり粒子でもある」という光の二面性を説明したのである。こうした粒子の波動性の研究は、ド・ブロイによって深められ、光子以外の粒子（電子、陽子、中性子など）も、光速に近い速さで運動しているときは波としての性質が出てくることが明らかにされた。ド・ブロイは、すべての粒子は粒子としての性質、運動量 p のほか、波としての性質、波長 λ も持っていて、

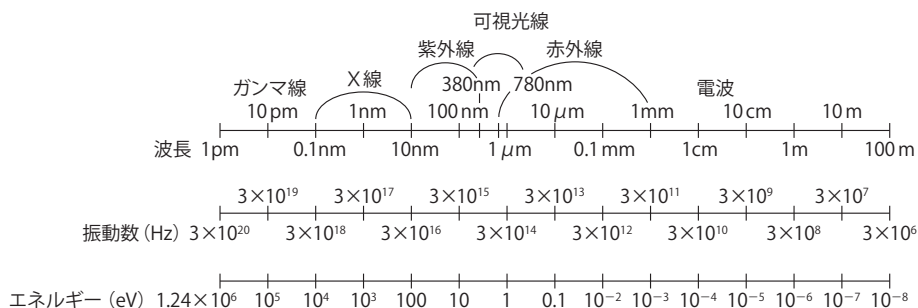


図1 電磁波の分類と波長，振動数，エネルギー

$$\lambda p = h \quad (2)$$

の関係を導出した．さらに，ハイゼンベルクの不確定性原理の仮説を経て量子力学の体系の中で電子や光の持つ粒子と波動の二重性が確固としたものになった．「光は波か粒子か」という問いに対しては，今日「光は波であり粒子でもある」というのが正しい答えになる．

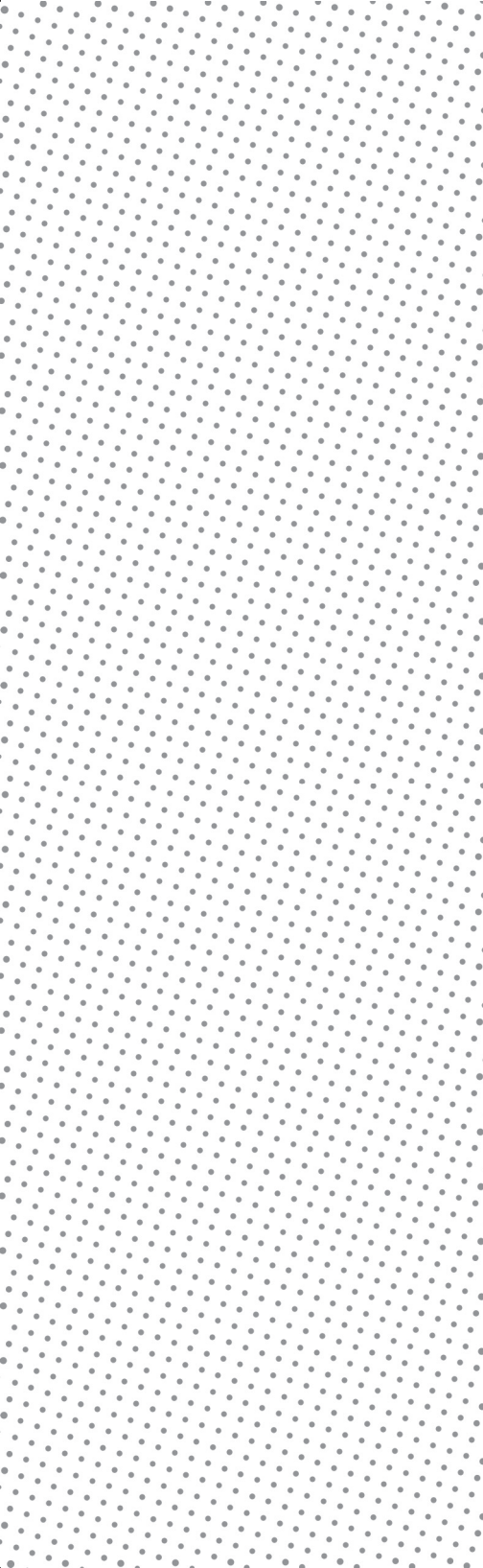
波の一周期の長さが波長，波の高さが振幅，単位時間にある波の数が振動数である．図1は電磁波の分類と波長，振動数，エネルギーを示している．通常光というと紫外線，可視光線，赤外線を指すが，X線，ガンマ線，マイクロ波，電波も光と似たような性質を持つ電磁波である．図1において「光は波であり粒子でもある」性質が現れているのが，波長や振動数の値がエネルギーと同じ座標軸に表されていることである．例えば， $1 \mu\text{m}$ の波長の近赤外線のエネルギーが1.24 eVである．図1では，式(1)から予想されるように波長が短いほどエネルギーが大きくなっている．

③と④ 光は波か粒子かについて歴史的に長く議論されてきた．光の干渉，反射，屈折などは波としての性質をよく表している．光電効果の実験によって，光は粒子の性質も持つことが分かった．結論として，光は電磁波の一種で波であり粒子でもあり，電子などとともに量子力学の体系の中で説明される．

水素が燃える炎は、185 ～ 260 nm の範囲で強く、赤外線領域で弱く発光が存在する。石炭の炎は非常に弱い紫外線と非常に強い赤外線の波長の光を放出する。このように火災検知器は、紫外線と赤外線両者の検知器を備えたほうが、紫外線のみを検知器より信頼性が向上する。すべての炎には、多少の差はあるが UVB バンドの放射がある。火災以外の用途として、紫外線検知器は、アーク放電、電気火花、稲妻、非破壊検査に使用される。

紙幣や重要な証明書（例えば、健康保険証、運転免許証、パスポート）には、偽造防止のため、紫外線照射時に見ることのできるマークを含むものがある。ほとんどの国が発行しているパスポートは、紫外線感度の高い蛍光物質を含むインクで偽造防止の細い線が書かれている。カラーコピーやプリンターではこれらを再現することができないので、偽造品を見分けることができる。

③④⑤ 紫外線は人間には見えない波長が 10 ～ 380 nm の電磁波である。太陽からの紫外線のうち UVA (380 ～ 315 nm), UVB (315 ～ 280 nm) が地表に届き、皮膚の老化、日焼け、皮膚がん、白内障の原因になる。紫外線は、殺菌消毒、蛍光灯、フोटリソグラフィ、火災報知機、証明書の偽造防止などに利用されている。



第 2 章

色の見え方

私たちは光や色をどのようにして認識しているのだろうか？ この章では、人間の眼の仕組み、色を感じる視細胞と神経伝達の働き、光と色の3原色、色は客観的なものかどうか、色が人の心の動きに与える影響についても述べる。

8 話 光の3原色とは？

暗闇で見えるのは灯火など、それ自身が光を出しているものである。光の性質については、太陽光、電球、蛍光灯によって見え方がだいぶ違う。蛍光灯は赤色光が少ないので赤は暗く見えるが、白熱電球では赤色光が多いので赤っぽく見える。

私たちは太陽の光を色がない、または白色だと感じているが、プリズムに通すとそれが7色に分かれることを知っている。これは、人の眼で見ることのできる光(可視光線)が、380～780 nm までの色の光が混ざり合って白色になっているからである。

赤、緑、青の3つの光を割合を加減して重ね合わせるとあらゆる色の光を作り出せることが分かっている。それでこの3つの光を光の3原色という。原色とは、混合することであらゆる種類の色を生み出せる、互いに独立な色の組み合わせのことである。互いに独立な色とは、2つを混ぜても残る3つ目の色を作ることができないという意味である。図7に示すように、光の3原色のうち赤と緑の光が混ざると黄、緑と青が混ざると青緑(シアン)、青と赤が混ざると赤紫(マゼンタ)、赤・緑・青すべてが混ざると白になる。光は原色の色を混ぜるほど色が明るくなる。光の3原色は混合すると明るくなるので加法混合と呼ぶ。光の場合には赤・緑・青の3つの色の強度を変えて混ぜ合わせると、ほぼすべての色が再現できる。図7には示されていないが、例えば茶色は赤：緑：青＝128：64：64と混合すれば得られる。

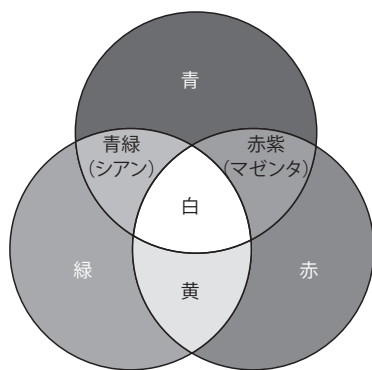


図7 光の3原色と原色の混合による色

原色は電磁波の本質的な要素ではない。国際照明委員会(CIE)が1931年に定めたCIE標準表色系は、単色の原色の定義を定め、その波長を700 nm(赤)、546.1 nm(緑)、435.8 nm(青)としている。テレビやディスプレイ類は光の3原色を用いて色を表現している。用いられる波長は、赤(波長:625～740 nm)、緑(波長:500～560 nm)、青(波長:445～485 nm)である。

原色は生物の眼が可視光線に対して起

こす生理学的反応と結び付いている。天然光や照明などの光は、あらゆる波長の放射エネルギーが含まれており連続的なスペクトルを持つ。その情報は無限次元にわたるが、人間の眼はこれを赤・緑・青の3次元の情報として処理している。例えば赤と緑の光を加え合わせると黄色になるが、これは太陽光をプリズムで分光した黄色の光（波長 589 nm 附近）や高速道路のトンネルなどに使われているナトリウムランプ（波長 589.0 と 589.6 nm）と同じではない。赤と緑の光を加え合わせた光は幅広い波長範囲を含んだ光である。これらが同じ色に見えるのは、人間の視細胞からの情報が視神経を經由して大脳の視覚野で判断しているためである。

人間の眼の奥の網膜には一面に光受容細胞（錐体細胞と桿体細胞）があるが、光量が十分な場合は3種類からなる錐体細胞が反応する。錐体細胞には、長波長に反応する赤錐体、中波長に反応する緑錐体、短波長に反応する青錐体の3種類があり、それぞれの波長に最も反応するタンパク質を含む。これらが可視光線を受感することで信号が視神経を經由して大脳の視覚連合野に入り、ここで赤・緑・青の3種類の錐体からの情報の相対比や位置を分析し、色を認識している。

色覚異常とは色の感じ方が大多数の人と違うことである。色盲とか色弱とかいわれているが、色の区別が全くつかない人は稀で、多くの人は赤と緑の区別がつきにくいタイプである。色覚異常の人は日本人男子の約5%に見られるが、女子は約0.2%で、多くの場合先天性である。フランスや北欧ではこの倍程度である。これらの人は、赤または緑の錐体細胞に異常があるので、赤系統～緑系統の色弁別に困難が生じるが、正常色覚とほぼ同程度の弁別能を持つ者も多い。

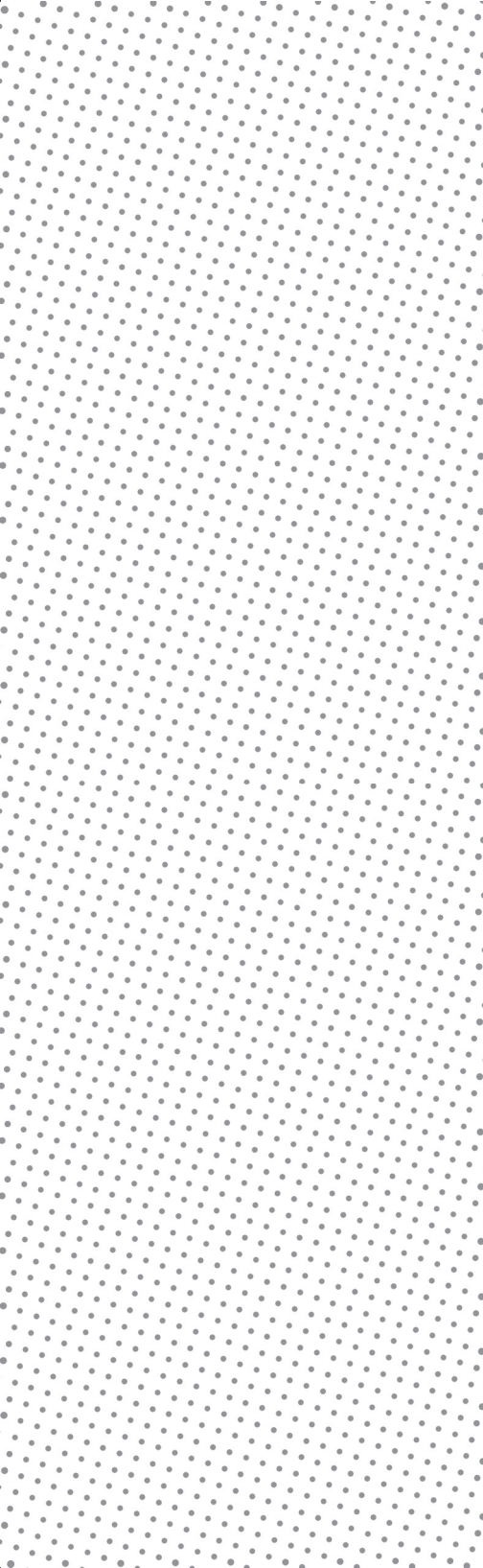
③④⑤ 赤、緑、青の3つの光を割合を加減して重ね合わせてあらゆる光を作り出せるので、光の3原色と呼ぶ。人間の色を感じる視細胞が3種類からなることに対応している。錐体細胞には、長波長に反応する赤錐体、中波長に反応する緑錐体、短波長に反応する青錐体の3種類があり、信号が視神経を經由し大脳の視覚連合野で色を認識している。

コラム

昆虫の視力と色覚

昆虫は複眼を持っている。個眼の数はイエバエ 2 000 個、ホタルのオス 2 500 個、トンボ 2 万個程度である。複眼は視界が広く図形認識能力を持つ。さらに少しの動きでも複数の個眼でとらえるため大きな動きとして見え、狩りで動く獲物を発見したり、天敵が襲ってきていることを察知したりするのに役立つ。ただし、昆虫はかなりの近眼で、推定視力はカマキリで 0.03、アゲハで 0.02、ミツバチで 0.01 である。昆虫は遠くを見る視力はないが、近くの動体視力にすぐれている。

ヒトの色覚は網膜に含まれる赤・緑・青の 3 種類の錐体でなされるのに対し、ミツバチやハエなどの色覚は紫外・青・緑の 3 種類の視細胞でなされている。それぞれの視細胞にはオプシンタンパク質とレチナールの分子があって各波長の光に反応する。ミツバチが多く集まる花びらを紫外線で観察すると花びらの周辺部は紫外線を多く反射し、蜜のある中心部は紫外線を吸収している。それで、ミツバチは紫外線を反射しているものを目標に飛んできて、蜜のある場所を見つけることができる。アゲハチョウは紫外・紫・青・緑・赤・広帯域の 6 種類の視細胞がある。このうち広帯域に対応する視細胞には赤と緑に対応したオプシンタンパク質が同時に反応している。モンシロチョウは 9 個の視細胞がある。そのうちの一部は蛍光を発することが知られている。



第 12 章

植物と色

植物は季節によって若葉の黄緑色から緑へそして秋の赤または黄と変化する。花には多様な色があり季節や時間帯によってさまざまに変化する。この章では、葉の色変化の理由、アジサイやアサガオの花の色の変化、海藻がいろいろな色を持つ理由について述べる。

65 話 黄緑色の若葉はなぜ日々緑色が濃くなるか？

自然界で最も身近な色の一つは、草や木の葉の緑色である。春になれば黄緑色の若葉が芽吹き、日に日に生長を重ねて緑が濃くなっていく。光合成は植物の活動のために必須な機能で、その中心的役割を果たしているのが葉の中にある葉緑素（クロロフィル）である。クロロフィルが太陽光のエネルギーを取り込んで、水と二酸化炭素からグルコースやデンプンなどを光化学的に合成して、植物の生長の源を作り出している。

図 59 はクロロフィルの光合成活動と光の波長との関係を示したものである。クロロフィルが光合成に利用できる波長域は 400 ～ 700 nm で、人間の可視域にほ

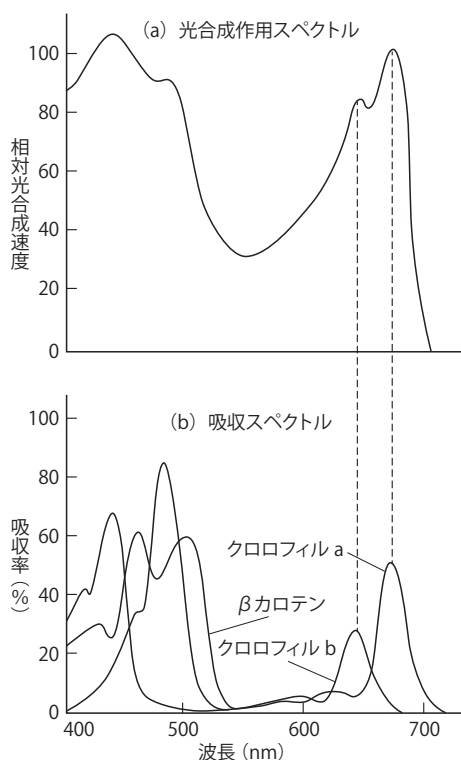
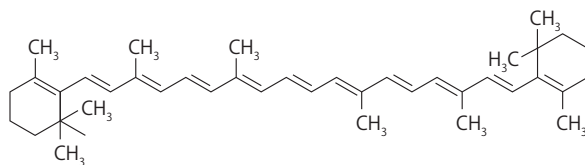


図 59 葉の色素の吸収ベクトルと光合成スペクトル
[出典：シーシーエス（株）ホームページ]

ぼ一致している。クロロフィルは太陽光から赤の光エネルギーを効率よく吸収するための色素である。その上、光エネルギーの収集効率を上げるためにわずかに極大吸収を換えた複数の色素が配置され、中心の色素分子に光エネルギーが集中するようになっている。クロロフィルによる光の吸収は 680 nm 付近の波長の光に吸収ピークがあり、光合成反応の中心的な役割をしている。クロロフィルの吸収スペクトルは、短波長域と長波長域が高く、中波長域が低い。葉面に降り注いだ太陽光の一部は反射され、残りが葉の内部に進入する。葉の内部に進入した光がクロロフィルに当たると、短波長光と長波長光はクロロフィルによって多くが吸収されて光合成に使われるのに対して、中波長光は吸収されにくい。ため、中波長光の多くが葉から再び

図 60 β カロテンの分子構造

外部に放出される。可視光の中波長域の光は、私たちは緑色に感じるので、葉の色も緑色に見える。また、私達の眼の波長感度特性は、可視域中央部の感度が最も高いこともあって、葉の色はより一層明るく鮮やかな緑色に見えるのである。

クロロフィルの構造は、図 24 に示したように、ポルフィリン環からなり、マグネシウム金属が中心にある。しかし、金属イオンだけでは緑や赤にならないので、外側のポルフィリン環が共役二重結合を持っていて発色に重要な役割をしている。

新緑のころの葉は明るい黄緑色をしているが、夏になると緑色が濃くなる理由はなぜだろうか。葉にはクロロフィルのほかにもカロテノイドという色素も含まれている。カロテノイドは天然に存在する色素で、化学式 $C_{40}H_{56}$ の基本構造を持つ化合物の誘導体で、光合成を行う葉緑体には必ず含まれる。炭素と水素のみでできているものはカロテン類、それ以外を含むものはキサントフィル類という。 β カロテンの分子構造を図 60 に示す。 β カロテンは多くの共役二重結合が連なっている。 β カロテンは 400 ～ 540 nm の領域の短波長域の光を吸収し中波長域や長波長域の光は反射または透過するため黄色く見える。新緑の葉の色が黄緑色に見えるのは、クロロフィルが十分作られていないために、カロテンとクロロフィルの両方の色素が寄与するためである。しかし、夏が近づくとも植物は強い太陽光を利用して光合成を行なう。そのため葉のクロロフィルの色素の量が増えるのでカロテンの黄色が目立たなくなり緑色が濃くなる。そして、鮮やかな緑色であった葉の色は秋には黄色く色づく。草木の葉の晩年にはクロロフィルが分解されて、クロロフィルの緑色が目立たなくなる。そして、次第にカロテンの黄色、またはアントシアニンの赤が目立つようになって、黄葉または紅葉となるのである。

(まとめ) 植物の緑は葉の中に含まれているクロロフィルの色素による。新緑の葉が薄い黄緑色なのはカロテンという黄色の色素も含まれていて、クロロフィルの緑と重なるためである。夏になるにつれて緑色が濃くなるのは光合成を活発に行うためにクロロフィルの量を増やすので黄色の色素が目立たなくなるためである。

色と光のはなし
科学の眼で見る日常の疑問

定価はカバーに表示してあります。

2017年9月15日 1版1刷発行

ISBN978-4-7655-4483-2 C1040

著 者 稲 場 秀 明
発 行 者 長 滋 彦
発 行 所 技報堂出版株式会社
〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-2-5
電 話 営 業 (03) (5217) 0885
編 集 (03) (5217) 0881
F A X (03) (5217) 0886
振 替 口 座 00140-4-10
U R L <http://gihodobooks.jp/>

日本書籍出版協会会員
自然科学書協会会員
土木・建築書協会会員

Printed in Japan

©Hideaki Inaba, 2017

装丁：田中邦直 印刷・製本：愛甲社

落丁・乱丁はお取り替えいたします。

JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail:info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。