

虹色の世界を化学する

Ver.1.0.0

鹿島 長次

(2010.3)

目次

1. まえがき	3
「地球は青かった」	3
すべての色を混ぜたら白か黒	5
2. 粒子の性質と波の性質を持つ光	8
飛び込んだ蛙の運動エネルギーを伝える波	8
電磁波は磁場と電場の波	9
速度が遅くなると曲がる光	12
波長の長さで変わる光エネルギーの大きさ	16
右に磁場を持つ光と左に磁場を持つ光	19
3. 原子が興奮すると色っぽい	22
太陽系と良く似ている原子の構造	22
不連続光を吸収や発光する原子	25
金属陽イオンは色が付き難い	29
人間の眼の不思議	32
絵の具は化学変化し難い色素物質	35
4. 軟弱な結合ほど色がある	40
2重結合が連なると色付く	40
亀の甲を持った物質は色彩豊か	44
遷移金属元素に鮮やかな色を与える配位結合	49
発光や太陽光発電をするダイオード	52
紺碧に見える深水の水も掬えば無色透明	55
5. 光の吸収で始まる光化学反応	58
単結合を切る紫外線	58
紫外線の光が密接に関係するオゾン	60
6. 眼が見えるようになる2重結合の回転異性化	65
加熱しても回転異性化し難い2重結合	65
光に照らされると回転異性化する2重結合	67
ロドプシンの回転異性化で光を感じる網膜	68
7. 光化学反応は4員環化合物の簡便な合成法	73
環歪みを蓄えている4員環化合物	73

容易に光エネルギーで生成する 4 員環化合物.....	75
4 員環の分解で蛍は光る.....	79
8. 生物の活力を生み出す太陽の光.....	83
生物の活力となるエネルギーは酸化反応から.....	83
結んで開いて合成されるブドウ糖.....	85
太陽の光を効率よく栄養に変える葉緑素.....	87
9. すべての色の基準は虹の色.....	92
遷移金属元素や多重結合を含む物質には色がある.....	92
虹色の光に適応して棲息する生物.....	93
索引.....	96

1. まえがき

「地球は青かった」

1961年にソヴィエト連邦の人工衛星ボストーク1号に乗って、宇宙飛行士 Гагарин (ガガーリン) が人類で始めて地球を外側から見ましたが、そのときの第一印象を「地球は青かった」という言葉で表現していました。しかし、著者の印象に残っている旅先の地は色とりどりでした。伊豆七島三宅島の浜辺は黒い砂が印象的でしたが、兵庫県の明石の海岸は白砂青松で古くから知られています。北極を横切る飛行機の窓からは白く光る氷河に被われたグリーンランドが見下ろされましたし、上空から見下ろした太平洋は黒味を帯びた青色でした。赤毛のアンの舞台となっているカナダのプリンスエドワード島の海岸がレンガのような赤色であったことは今でも思い出されます。日本の周囲は海の水で区切られています。濱辺にたつて臨む海は場所と時間により大いに異なった色を呈します。佐賀県の虹ノ松原や鳥取砂丘から望む海は昼間の太陽を背にするためか青黒く見えますが、湘南茅ヶ崎海岸や浜名湖近傍の舞阪の海は同じ時刻に太陽を真っ向から受けて黄金色にキラキラと輝いてほとんど青く見えません。夕方になると三浦半島の葉山海岸や福井県の東尋坊から望む海も茜色に染まってしまいます。著者の尋ねた旅先でも、場所や時間や天候により陸地も海もその色が変化します。

このように色とりどりの顔色をした地表には色とりどりの植物が生い茂り、色とりどりの動物が動き廻って生活しています。2月になると紅梅や白梅が咲きはじめて、さびしい冬景色を明るくします。春の彼岸を過ぎる頃からは桜や桃が薄紅色の花を一齐に咲かせて世界が急に華やかになります。赤みを帯たものから白色の優ったものまで種々の水仙が黄色く咲き揃います。パンジーは黄色や紫や赤色が複雑に入り混じった花を付けますから、三色堇とも呼ばれています。夏も近づく八十八夜の頃になると、紫や黄色のアヤメが咲き始めますが、同じような形でも菖蒲や杜若やアイリスは紫や青や黄色の地に白や黄色の斑点が細かく散りばめられたような花を付けます。梅雨時に咲く紫陽花は赤と青の花を付けますが、全く同じ色のリトマス試験紙が化学実験室には必ず常備されています。秋口に咲く粹芙蓉は1日で咲き終えてしまう花を付けますが、早朝の咲き始めには白、陽が高くなるに連れて花は赤みを帯び、陽が傾く頃には酒に酔ったように花はほんのりと赤く染まって萎みます。

高原では、夏が過ぎて真っ先にナナカマドや樺や山漆などの漆科の木が紅葉します。続いて白樺や榛の木や朴ノ木などが鮮やかな黄色に色付きます。唐松が黄色に変わると山の冬が間近にやって来ます。北米ミシガン湖の北部地方を自動車旅行した折に、走れども走れども黄色の楓の森が続いていたことを記憶していますが、日本の楓は紅葉しますから、日光や昇仙峡などでは山が焼けるようになります。東京近郊で最後に櫨と銀杏が黄色く色付いて散ってゆき、すべてが落葉した後は、椎や山茶花や椿や楠などの照葉樹が暗緑色の葉を残して冬になります。

1年を通して草や木が色とりどりの変化をするように、色とりどりの色で彩られた昆虫や鳥も子孫を殖やしなから生活を営んでいます。銀ヤンマが青く光る尾を伸ばしてスーッと水の上を通り抜け、紋白蝶は菜の花の周りをヒラヒラと白く舞っています。山椒の葉を食べて大きく育った緑色の芋虫はいずれ揚羽蝶になります。褐色の幼虫の背中を割って這い出した成虫は数時間ののちに薄緑色の羽根が褐色に変色して蟬の脱皮が完了します。黒光りする地に朱色の水玉模様の斑点を持つ天道虫は米国では Ladybug (淑女のような虫) と呼ばれ、縁起の良い虫とされています。

カラスは黒く光る羽で渋く身支度していますが、同じカラス科のカケスは青や赤褐色の羽で着飾っています。啄木鳥の間でも、アオゲラは草色の羽根を身に纏い、アカゲラは頭と腹の部分を赤く染めています。目の周りだけ白く丸いアイシャドウをし、鶯色の衣装に身を包んだ目白は早春の梅の花を好みます。春先の高原を散策すると種々の鳥が恋の季節になって逢引をしている光景に遭遇します。人間は恋の季節になると女性が色鮮やかに着飾りますが、四十雀は雄だけが鮮やかな若葉色にお洒落をします。同じように雌のコルリは目立たないような茶色の普段着ですが、雄は群青色の鮮やかな羽根を身に纏っています。

このように種々の生物は色とりどりの色で輝きながら調和し、子孫を殖やすために自己主張をし、混ざり合って美しく地表面を飾り挙げています。この自然が織り成す色とりどりの色が混ざった景色を平安時代の歌人素性法師と能因法師はそれぞれ古今集と後拾遺和歌集の中に、美しい錦織の布に例えた歌を残しています。

**見渡せば 柳桜を こき混ぜて 都ぞ春の 錦なりけり
嵐吹く 三室の山の もみぢ葉は 竜田の川の 錦なりけり**

錦織の布にたとえられるような極彩色の世界の中で人間は時と場所と状況で変化する種々の色に対して種々の感情や意味を感じています。明度の低い色は地味で暗く感じ、赤や黄色の明るい色は華やかな暖かさを感じさせます。平安時代の末期、平治の乱に始まり壇ノ浦の戦いで終止符を打った源平の合戦では源氏は白旗を平氏は紅旗を翻して戦ったと伝えられています。このときの紅白入り乱れての合戦が感傷的に再現されるように、現在も運動会などで紅白に分かれて競い合う習慣が残っています。同じように古きよき時代のドイツ義勇軍とブラバント公国を象徴する黒と赤と黄の色が感傷を込めてそれぞれドイツとベルギーの国旗を染め分けています。フランス革命以後に用いられるようになったフランス国旗は自由を意味する青と平等を意味する白と博愛を意味する赤の三色旗(トリコロール)に考えられています。横縞のロシアの三色旗も同じ色の組み合わせですが、白は高貴と率直の白ロシア人を、青は名誉と純潔の小ロシア人を、赤は愛と勇気の大ロシア人を表わしているそうです。緑と白と赤の三色旗〔トリコロレ〕は国土と平和と熱血を意味するイタリアの国旗です。同じように三色旗を国旗とする多くの国がありますが、日本

が国交を持つ国のうちで横
縞あるいは縦縞の意匠を
持つものを図 1-1 に



ドイツの国旗



ベルギーの国旗



イタリアの国旗

掲げておきますが、
中には非常に類似
した国旗もありま
す。これらの三色
旗の赤一色だけを見てもフランスでは博愛を、ロシアでは愛と勇気を、イタリアでは熱血を意味し、フランス革命やロシア革命や中国国共内戦の象徴の色とされたことから、日本では 1950 年代に革命を夢見る共産主義を意味していました。オリンピックのシンボルはヨーロッパと南北アメリカとアフリカとアジアとオセアニアの 5 大陸を象徴するように青と黄と黒と緑と赤の 5 色の輪を繋いだ形をしていますが、それぞれの色に抱く感情や意味が人々により異なりますから、個々の大陸と色との間の特定の対応をあえて避けています。



フランスの国旗



ロシアの国旗



オランダの国旗



ルクセンブルグの国旗



マリ国旗



ギニアの国旗



リトニアの国旗



アイルランドの国旗



コートジボアールの国旗



エストニアの国旗



シエラレオネの国旗



ルーマニアの国旗



チャドの国旗



コロンビアの国旗



ガボンの国旗



イエメンの国旗



オリンピックシンボル

図1-1 三色旗とオリンピックシンボル

すべての色を混ぜたら白か黒

春秋戦国時代の中国では万物が 4 つの独立した元素とそれらを繋ぐ中心の元素でできているとする五行思想が考えられていました。人間の身体は肝臓、心臓、脾臓、肺臓、腎臓の 5 臓が働いて機能し、穀物は麻と麦と稲と黍と大豆の五穀からなると考えていました。うなぎを食べる習慣のある夏と秋を結ぶ土用を含めて、季節は春夏秋冬の四季とその間を結ぶ土用からなると考えていました。また、動物の代表は龍と孔雀と虎と武と麒麟の五獣（五龍）が考えられていたようです。当然、青と朱〔赤〕と白と黒と黄の 5 色の組み合わせで地上のすべての色ができていると考えられていました。この五行思想は古く日本に輸入されましたから、現在でも多くの習慣や言葉が残っています。例えば、色と季節が結び

ついた青春、白秋、朱夏、玄冬などの言葉が残っていますし、色と動物が結びついた青龍、白虎、朱雀、玄武、麒麟（黄麟）は高松塚古墳の壁画に描かれ、平城京の入り口の朱雀門や幕末会津で討ち死にした白虎隊や火山岩の一種の玄武岩に名が残っています。同じように大相撲の土俵の上には青房（実際は緑房）と赤房と白房と黒房が下げられています。

著者が利用しているプリンターは黒と黄とシアンとマゼンダの 4 色のインクを用いていますが、シアンとマゼンダはそれぞれ青と赤に相当し、これらに加えてインクを用いず紙の白地を利用してあらゆる色を合成して印刷しています。2000 年前に五行思想で考えられていた青と朱（赤）と白と黒と黄の 5 色の中で、最も明るい白色から最も暗い黒色まで白と黒が明るさの基本ですから、色の基本は残りの青と赤と黄の 3 原色となり、奇しくもプリンターの基本となるインクの色と全く同じです。この 3 原色のインクの混ぜる割合を変化させることによりあらゆる色が合成されていますが、すべてのインクを混ぜますと黒になってしまいます。

夕立の後には図 1 - 2 に示すようにしばしば 7 色の虹が現れますが、太陽から地表に届く光をプリズムに当てても同じような虹色の 7 色が現れます。この現象はプリズムが図 1 - 3 に示すように太陽の光を 7 色の光に分けていると考えられています。日本では虹の色は一般的に赤、橙、黄、緑、青、藍、紫の 7 色と考えられていますが、著者は子供時代から藍をあまり識別できませんでした。この虹の色も地域や民族や時代によりそれぞれ異なることを最近になって知り、何となくホッとしました。例えば、欧米では虹の色が赤と橙と黄と緑と青と紫の 6 色とを感じる人が多いようです。アメリカの画家 Munsell は虹の 6 色の両端を結んでマンセルの色相環を考え、光もインクと同じように赤と黄と青の 3 原色を混ぜると、それぞれ中間の橙と緑と紫は調合できると整理しました。このことを利用して、劇場では赤と黄と青の 3 原色の光を照明に用いて色とりどりの色を造り出して舞台を演出していますが、照らしている 3 原色の光が一点に集まると無色の光に変わります。このことから、五行思想の昔から考えられ、感じられてきた 3 原色も光とインクでは混ぜ合わせた時に大いに違いのあることが分かります。

果物の色素の中には酸性のときと塩基性のときで色調の変化する物がありますから、このような色素が衣服に付着した場合には、この色調変化により染み抜きできる場合もあり



図1-2 夕立後に現れた虹

ます。例えば、林檎の赤色、苺の赤色、葡萄の紫色、紫蘇の紫色、茄子の紫色はアントシアニン系の色素ですが、いずれも塩基性では青色の色調が強くなり目立ってきます。石鹼水は無色ですが塩基性を示しますから、これらの色素が衣服に付着した汚れを洗濯しなすと強く青色に変色しますが、酸性にすれば弱い赤色に戻ることが多いと思われます。また、高校の化学の教科書に必ず出てきますから、知っている読者も多いことと思われますが、黄色い塩化第2鉄水溶液にフェロシアン化カリウム（黄血塩）の黄色い水溶液を混ぜますと、紺青と呼ばれる鮮やかな青色に変化します。光とインクの場合には赤色と無色を混ぜ



図1-3 7色の太陽光スペクトル

れば赤が保たれ、黄色と黄色を混ぜれば黄色になりますが、これらの2色の水溶液を混ぜますとどちらも青くなります。このようにマンセルの色相環では説明できない現象を、化学の研究を続けてゆきますとしばしば体験できますから「化学する」ことは楽しいのです。

秋の天気の良い日に、上を眺めれば青空が広がっています。ところが宇宙飛行士 Гагарин がはるか遠方から始めて見たとき「地球は青かった」そうです。この2つのことを考え合わせますと地球の外側に何か青い物質の集まった層があるように考えられますが、さらに遠方にあると思われる月や太陽は全く青く見えません。青い物質の正体は何でしょうか。虹色の世界にも五行思想では説明できない多くの不思議が潜んでいるように思われます。

光のない闇の世界ではすべてのものが黒一色にしか見えませんが、光が当たりますとこれらの黒一色のものが色とりどりの色に輝きますから、色と光は切っても切れない関係にあると思われます。言い換えれば、原子やイオンや分子などで構成されている物質とその物質に光が照射されたときに起こる変化により、色とりどりの色が目の前に開けてくるものと思われます。本書では日常生活で目にする色とりどりの色に化学の知識を織り交ぜながら独善的に調べて、色とりどりの色の光と物質の間にどのような関係があるか見てゆこうと思ひます。さらに、身近な事柄として動物や植物の色に対する感覚や色の変化のからくりの合理性を化学的に考えてみたいと思ひます。日常生活で見られる色の中に隠れた技術や知識のうちで、何か一つでも化学の研究や教育に役立つものを見つけ出せば良いと思ひます。また、逆に多くの化学的な技術や知識が日常生活を豊かにする新たな色の世界を生み出す助けになれば、本書はさらなる意義を持つことになると思われます。