

9. すべての色の基準は虹の色

遷移金属元素や多重結合を含む物質には色がある

太陽系では太陽が中心に座り、惑星が万有引力により太陽に結び付けられて周回していますが、原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が分布しています。それらの電子は原子核との間に働く静電的な引力で引き合っていますから、原子核の近くにある電子ほど大きな力で結び付けられています。しかし原子核も電子も非常に小さく極めて高速で運動していますから量子力学の支配を受け、原子核に結び付けられている電子はエネルギーの不連続で段階的な原子核に近い内側の軌道から順番に詰まって運動しています。当然、原子核に近い軌道には電子が充足していますが、外側には電子の入りうる軌道が存在します。このように原子核の近くの軌道に結び付けられている電子が外からエネルギーを受け取りますと電子は元気になって外側の軌道上に励起して不安定化しますが、この軌道間の電子の移動に要するエネルギーは不連続な固有の値を持っています。

2つの原子が接近するときにはそれぞれの原子に属する電子の軌道が互いに相互作用をして、原子間に引力の働くエネルギー的に安定な軌道と反発力が働く不安定な軌道が生じます。ここで原子に属する電子はエネルギー的に安定な軌道に移動するためにエネルギーの安定な基底状態になり原子は互いに共有結合します。共有結合のなかで単結合は比較的大きな結合エネルギーの σ 結合で結合し、2重結合では σ 結合のほかに、2個の電子が側面で相互作用して結合エネルギーの小さな π 結合で結合しています。また、3重結合は2個の電子による σ 結合と4個の電子による2本の π 結合で結ばれています。原子の中で電子が外側の軌道に移動して励起状態になるように、結合エネルギーに相当するエネルギーを受け取ると共有結合を形成する基底状態の電子は反発力の働く不安定な軌道に移動して励起します。

熱エネルギーあるいは光エネルギーを与えますと原子や分子は固有の大きさのエネルギーを受け取って、安定な軌道に収まって安定化している電子が不安定な軌道に移動して励起します。熱エネルギーや光エネルギーを吸収して励起した原子や分子の大部分は即座に同等の光エネルギーを発して基底状態に戻りますが、ごく一部分の励起した原子や分子は光エネルギーを放出することなく、原子の運動や分子の変形や共有結合の切断などによりエネルギーを損失し、熱エネルギーを発散します。大量の熱エネルギーを与えますと物質を構成する原子や分子は励起しますが、そのとき受け取ったエネルギーは光エネルギーとして放出されます。また、物質を構成する原子や分子に光エネルギーを与えますと、光エネルギーを吸収し同時に同等の光エネルギーを放出します。このとき吸収した光エネルギー量よりも放出する光エネルギー量のほうが少なくなりますから、物質に与えた光エネルギーは減少してしまい、物質が光を吸収したように見えます。その上、電磁波のエネルギーがその電磁波の波長に反比例する関係にありますから、原子核に結び付けられている

電子はある固有の波長の電磁波を吸収して励起状態に電子が移動します。ここで、原子核の周囲に存在する電子は固有の波長より短い電磁波も長い波長の電磁波も吸収できず、エネルギーの授受がありませんから不安定な軌道上に励起することはありません。また、不安定な軌道に励起された電子が安定な軌道へ戻るときに発生するエネルギーも不連続な固有の値を持っていますから、放出される電磁波も不連続な固有の波長を持っています。このように原子や分子や金属が大きな熱エネルギーを受け取りますと光エネルギーを放出して発光しますし、適当な波長の光エネルギーを受け取りますとわずかながらその光エネルギーを吸収して熱エネルギーへの変換や化学変化を起こします。

原子の最も外側の軌道に分布する外殻電子は小さなエネルギーで不安定な軌道に励起しますが、このエネルギーは種々の元素により異なり、小さなエネルギーで励起する原子やイオンは長い波長の電磁波を吸収します。原子核の周囲に存在する電子数が少ない元素では外側の軌道への励起に比較的大きなエネルギーを要しますが、主量子数が 4 以上の電子を多く持つ元素では最外殻軌道に 2 個の電子が入ってから、隙間を埋めるように主量子数 3 の内殻の軌道に順次電子が充足されてゆきます。このように内殻の軌道に電子が充足してゆく遷移金属元素は外殻に 2 個の電子を持っており、小さなエネルギーを吸収して容易に 2 価陽イオンになりますが、隙間を埋めるように内殻を充足している電子はそれよりもさらに小さなエネルギーで最外殻軌道へ励起しますから可視光線を発光したり吸収したりします。また多くの原子が結合した分子も結合エネルギーに相当するエネルギーを受け取ると共有結合を形成する基底状態の電子は反発力の働く不安定な軌道に移動して励起します。このとき σ 結合は大きな結合エネルギーを持っていますから、短波長の紫外線が関与しますが、 π 結合は結合エネルギーが小さいために比較的長波長の紫外線から可視光線の領域の光を発光したり吸収したりします。このように物質を構成する原子や分子はそれぞれ固有の波長の光を発光したり吸収したりしますから、光に対して物質はその構造や性質を反映する挙動を示します。

虹色の光に適応して棲息する生物

太陽は水素とヘリウムの原子が極めて高い密度で集合していますから、それらの原子は核融合を繰り返して高温に温められています。そのため太陽は中性子や陽子や α 線などの粒子のほかに、非常に短波長の γ 線から長波長の赤外線まで広い波長領域の電磁波を輻射し続けています。太陽が輻射するこれらの粒子や電磁波の約 0.1ppb しか地球には到達しませんが、それでも非常に多くのエネルギーを受け取って地球は比較的温暖な世界を保っています。太陽が輻射した陽子や電子などの電荷を持った粒子は地球の持つ地磁気により遮蔽されてしまい地表に到達しません。電荷を持たない中性子は地磁気には影響されずに地球に向かって突進してきますが、地球を覆っている大気中の酸素と窒素に衝突して核反応し、それぞれ窒素と炭素に変換します。太陽は水素やヘリウムの原子で被われていますし、地球は酸素や窒素の分子を主成分とする大気で被われていますが、これらの物質は短波長

の紫外線を吸収する性質を持っていますから、太陽から輻射された広い波長領域の電磁波の大部分を吸収してしまいます。これらの短波長の電磁波を吸収した地球大気中の酸素や窒素の分子は光化学反応によりオゾンや酸化窒素に変換されて光エネルギーを消費してゆきます。その結果、図 3 - 1 の赤線で示すように 300nm 以上の比較的波長の長い紫外線と可視光線と赤外線だけが地表に到達しますが、その太陽光スペクトルは 460nm で最も高い強度を持ち波長が長くなるに連れて強度が小さくなる相対的に紫色から青色の比較的短波長の可視光線に偏っています。

このように紫色から青色の可視光線が相対的に強い太陽光の降り注ぐ世界に棲息する生物は物事を知覚したり活力の源となる物質を作ったりするために、比較的波長の長い紫外線と可視光線と赤外線を効率よく吸収する機構を持っています。人間の眼は角膜と水晶体と硝子体で構成される光学系により光学像を網膜上に結び、網膜上で起こるロドプシンの変化を視神経が知覚し、その情報を視覚中枢で整理する機構を持っています。網膜部分には青色と緑色と赤色の光に高い感度を持つ 3 種の感光物質が分布しており、400 ~ 700nm の波長領域の光を認識しています。人間はこれらの感光物質が感じる光の感度を補正して太陽の光を白色(無色)に感じるように視覚中枢で認識しています。言い換えれば、虹の 7 色の光が太陽光スペクトルの強度比で同時に眼に入ると、人間はそれぞれの光の色を打ち消すように白色(無色)の光として認識します。ある波長領域の光の強度比が大きい時にはその領域の波長の色を知覚しますし、反対にある波長領域の光の強度が小さい時にはその補色を知覚します。

遷移金属元素では隙間を埋めるように内殻を充足している電子が小さなエネルギーで最外殻軌道へ励起しますし、 π 結合は結合エネルギーが小さいために容易に励起されて可視光線を発光したり吸収したりします。小さなエネルギーで励起するこのような物質が太陽光に照らされれば、特定の波長の可視光線を吸収して、その波長領域の強度の小さい光が透過したり反射したりしますからその補色に見えてきます。この性質を利用すれば物質の吸収強度を測定することにより、遷移金属元素の分析が可能になりますし、炭素原子を中心元素とする有機化合物の多重結合の状態を知ることにもできます。また、化学の知識や技術を駆使することにより、遷移金属元素の種類や状態を変化させたり多重結合の数を変化させることにより吸収する光の波長領域を変化させることが出来ますから、物質の色を自由に調節することが出来ます。そのために遷移金属元素や多重結合を含む物質が多くの染料やインクや絵の具などに用いられています。

地上に棲息する生物の栄養となる物質は活力の源ですからエネルギーを蓄積している高い還元状態の物質でなければならず、生産するためにはエネルギーの供給を必要とします。地球上で広く定常的に得られるエネルギーは太陽からの光エネルギーであり、活力の源となる物質の生産にこの光エネルギーを利用するためには、太陽光の強度の高く光エネルギーの大きな 400 ~ 500nm の領域の紫色から青緑色の光を吸収する物質を利用することが効率的です。この領域の色の光を吸収しますとその補色に相当する黄緑色から橙色の光

が透過あるいは反射してきますから、太陽の光エネルギーを効率的に利用する物質は緑色から黄色の色調を呈すると思われます。実際、多くの植物は葉緑素と呼ばれる緑色の物質を用いて太陽からの光エネルギーを効率よく吸収して高い還元状態のブドウ糖を栄養物質として生産しています。しかし、水が長波長の赤色の光を吸収してしまいますから、水深の深い所では波長の短い紫色の光をより効率的に吸収できるように褐色の物質が用いられている褐藻類が繁茂しています。このように地表に届く太陽光のスペクトルの影響を受けて地表の植物が緑色になっていると考えられますから、光の状態や大気成分などが地球と異なる太陽系外の天体では、「太陽系外の天体には緑ばかりか黄色や赤色の植物があるかもしれない」と予測した米航空宇宙局（NASA）の研究者の論文も頷けます。

このように物質を構成する原子や分子はそれぞれ固有の波長の光を発光したり吸収したりしますから、光に対して物質がその構造や性質を反映する挙動を示すことは全宇宙における普遍性を持っているように思われます。しかし、人間をはじめとする全ての生物は紫色から青色の可視光線が相対的に強い太陽光の降り注ぐ世界に棲息して、物事を知覚したり活力の源となる物質を作ったりしています。そのために太陽光に対して効率よく適応するために、比較的波長の長い紫外線と可視光線と赤外線を効率よく吸収する機構を持っています。当然、そこには色に対する感情も生まれてきますから、緑色の森の中で平安を感じたり、赤色の炎に情熱を感じるようになり、国旗の色にも意味を持つようになっていきます。

本書では日常生活を彩る光と色を物質の中の原子や分子の構造や性質に関する化学の知識を織り交ぜながら独善的に調べてきました。さらに、身近な事柄としての光と色を生み出すからくりの合理性を化学的に考えてきました。また、日常生活を快適に暮らすための光と色の功罪についても考えてきました。日常生活を彩る光と色に関係する化学の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が見つけ出せば良いと思っています。また、逆に多くの化学的な技術や知識が日常生活を快適にする光と色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。本書が化学と光の関係を深める上で貢献できればよいと思っています。

索引

あ

Einstein.....8, 16, 23
 アクチニド金属元素 25
 アクリル樹脂 39
 アセチル補酵素..... 70
 アゾ染料 47
 アゾベンゼン45, 47
 アデニン 77
 Avogadro 17
 アルカリ金属 31
 アルコール..... 83
 アルドール.....86, 87

い

イオン22, 55
 イオン化エネルギー30, 31
 異性化反応.....66, 68, 86, 87
 一酸化窒素.....60, 61, 62
 インク6, 7, 33, 35, 52, 94

う

Woodward 43
 海螢ルシフェリン 81
 運動エネルギー 83

え

エクリップス 73
 エステル70, 80
 sp³型73, 74
 X線.....17, 19
 X線..... 18
 NADPH.....85, 87, 89, 91
 NADP 陽イオン87, 89, 91
 n型半導体.....53, 54, 55
 絵の具35, 36, 39, 94

塩化コバルト 39, 50
 塩化ビニル 59
 塩基性 6, 32
 炎色反応 13, 27, 31
 塩素ラジカル..... 58, 59, 62, 63

お

オゾン 60, 61, 62, 63, 64, 78, 94
 オゾン層 61, 63
 オゾンホール..... 61, 63
 オプシン 68, 69, 71
 織物 52

か

外殻電子 23, 30, 93
 回転異性化 65, 66, 67, 68, 69, 75
 回転障壁 74
 解離 55
 化学発光 81, 82
 拡散 62, 63
 核反応 93
 可視光線 11, 14, 15, 17, 18, 19, 27, 28, 29,
 31, 32, 33, 34, 42, 44, 46, 47, 58, 60, 61,
 67, 69, 75, 78, 79, 81, 87, 88, 93, 94, 95
 加水分解 68, 86, 87
 褐藻類 91, 95
 カテコール 47, 52
 価電子帯 53, 54, 55
 過マンガン酸カリウム 34, 35, 39, 47
 カリ明礬 50
 カルボン酸 83
 カロチン 43, 71, 72
 カロチン類 71, 72
 還元状態 83, 84, 85, 87, 88, 89, 91, 94
 還元電位 89, 90

還元反応	83
環状アミド	77
乾性油	36
γ 線	17, 18, 19, 28, 32, 93

き

幾何異性体	66, 68, 69
希ガス元素	25
気体	10, 11
基底状態 40, 42, 44, 49, 52, 58, 65, 67, 81,	
92, 93	
吸光係数	28, 42, 47, 56, 88
吸光度	28, 29
吸収 .25, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36,	
39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51,	
53, 55, 56, 58, 60, 61, 62, 66, 67, 68, 69,	
71, 75, 78, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94,	
95	
吸着	52
鏡像	21
共鳴42, 43, 44, 46, 47, 87, 88, 89, 91	
共鳴エネルギー	42, 43, 44
共役	42, 43, 44, 46, 47, 69, 88, 90
共有結合 .18, 40, 41, 42, 49, 58, 61, 67, 75	
極大吸収	47, 48
禁制帯	53, 55
金属錯塩	50

く

グアニン	77
屈折	11, 13, 14, 15, 20, 21
屈折率	13, 14, 15, 20
グリセリン	80
クロロフィル	88, 90
クロロホルム	59, 64

け

Kekulé	44
結合エネルギー .40, 41, 42, 43, 49, 58, 59,	
65, 67, 75, 88	
結合距離	42, 60, 67, 75
ゲラニオール	70
ゲラニルピロリン酸	70, 71
原子核	22, 25, 29, 40, 92
原子間距離	73
原子吸光分析法	28
原子分極	10, 11
元素記号	25
堅牢性	48

こ

光化学オキシダント	61
光化学反応	58, 94
光学活性物質	20, 21
抗生物質	76, 78
光電効果	16
高分子化合物	10
五行思想	5, 6, 7
黒鉛	47
極超短波	18
五炭糖	86, 87
孤立電子対	44, 46, 47, 49
混成軌道	49, 50

さ

酸化	60, 64
酸化剤	47
酸化状態	83, 89, 90
酸化反応	64, 83
3 重結合	40, 42, 44, 74, 92
酸性	6, 48, 55
酸素	11, 47, 55, 60, 62
酸素 - 酸素単結合	79

酸素発生複合体.....	89
酸素ラジカル	60, 79
残留塩素	63

し

ジアゾカップリング反応	47
四塩化炭素.....	11, 59, 62
ジオキセタン環.....	79, 80, 81, 82
紫外線11, 14, 15, 17, 18, 19, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 42, 44, 47, 53, 55, 56, 58, 60, 61, 63, 67, 68, 75, 77, 78, 79, 87, 93, 94, 95	
視覚効率	33
色相環.....	6, 7, 34, 36
σ 結合40, 41, 42, 43, 44, 65, 67, 75, 92, 93	
cis	66, 68, 69, 71
磁性	9
質量数.....	22
シトクロム.....	90
シトシン	77
脂肪	80
脂肪酸.....	80
染み抜き	6
ジメチルアリルピロりん酸.....	70, 71
周期表.....	23, 24, 25, 53
重合	80
自由電子	53
縮合反応	86, 87
主量子数 .23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 40, 93	
Schrodinger	23
Jones	73
振動数.....	16, 18, 19
振動面.....	10, 19, 20, 21
振幅	16, 19

す

水酸基.....	47, 50
----------	--------

水質基準	63
水素結合	56, 59
水素放電管	26
水素陽イオン.....	55
スクワレン	71
スタッガード.....	73
スチルベン	45, 47, 66, 68
Snell.....	13
スペクトル .. 15, 19, 26, 27, 28, 29, 32, 34, 35, 36, 88, 91, 94, 95	

せ

正4面体.....	42, 73
正孔	53, 54, 55
静電引力	73
正電荷	11, 22, 56
整流作用	55
赤外線15, 17, 18, 19, 32, 33, 53, 55, 93, 94, 95	
セスキテルペン類.....	70, 71
セファロスポリン.....	76
遷移金属	25
遷移金属元素23, 25, 31, 32, 34, 49, 50, 92, 93, 94	
旋光	20, 21
染色	48, 52
洗濯.....	7
染料	33, 46, 47, 94

そ

双極子モーメント.....	11
---------------	----

た

ターピネオール	70
ダイオード	52, 55
褪色	52
ダイヤモンド.....	53

太陽光発電	55
多環式化合物	46
多重結合	42, 46, 92, 94
単結合	40, 42, 43, 44, 56, 58, 61, 65, 67, 69, 71, 79, 92
炭酸同化反応	86, 87, 91
炭素 = 炭素 2 重結合	41, 42, 43, 65
炭素鎖	43, 88
炭素 - 炭素単結合	41, 65
単体塩素	59, 63, 64
タンニン	52

ち

チアゾロン環	81
窒素 = 窒素 2 重結合	47
チミン	77, 78
中性子	22, 25, 29, 40, 92
長波	18

て

DNA	77, 78
デオキシリボース	77
鉄タンニン錯塩	52
テルペン類	69, 70, 71
電気エネルギー	55, 83
電気分解	60
典型金属	25
電子	22, 25, 29, 40, 92
電子対	49, 50, 55
電子の偏り	10
電磁波	18
電子分極	10
電磁誘導	9
電導性	53
伝導帯	53, 54, 55
電波	18, 28, 32

と

同位元素	22
投影法	73
糖類	86
trans	47, 66, 68, 69, 71
トリテルペン類	71
塗料	39

な

ナトリウムランプ	27
難燃性	59

に

二酸化炭素	83
二酸化窒素	60, 62
虹	3, 6, 7, 15, 34, 35, 92, 93, 94
2 重結合	36, 40, 42, 43, 44, 47, 48, 59, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 86, 87, 88, 92
二重性	8
Newton	8, 16, 22
Newman	73

ね

ネオンサイン	26, 34
熱エネルギー	55, 83
燃焼	83
燃焼熱	83

は

配位結合	49, 50, 55, 56, 88
配位子	49, 50, 55
π 結合	40, 41, 42, 43, 44, 47, 65, 66, 67, 69, 75, 88, 90, 92, 93, 94
配向分極	10
波長	18
発光	25, 26, 27, 28, 29, 52, 53, 55, 81, 82,

93, 94, 95	
発光ダイオード	55
発電	52
ハロメタン	58, 59, 61, 63
バンド	53
半導体	53
反応熱	83

ひ

p型半導体	53, 54, 55
pKa	55
光異性化反応	68, 69
光エネルギー	18, 42, 53, 55, 58, 83
光環化反応	76, 77, 78, 79
光センサー	55
光励起	76, 78, 79
非局在化	43, 88
非金属元素	25
歪み	73, 74, 75, 77, 79, 81
ビタミン A	71, 72
皮膜	80
比誘電率	10, 11
標準光	33, 34
ピロガロール	52

ふ

ファルネシルピロリン酸	70, 71
van der Waals	73, 74
フェノール	47, 50, 52
フェノールフタレイン	46
フェリシアン化鉄	39
フェレドキシン	90
フェロシアン化カリウム	7
フォトン	16, 17, 19, 20, 21
フッ素化反応	59
負電荷	11, 22
ブドウ糖	69, 84, 85, 87, 89, 91, 95

プラストキノン	90
プラストシアニン	90
Plank	16, 23
Fraunhofer	29
プリズム	6, 15
Fleming	76
フロン	59, 62
分光	15, 28, 29, 33
分子運動	11
分子間力	11

へ

β -ラクタム	77
β -ジカルボニル化合物	86, 87
ペニシリン	76
偏光	19, 20, 21
偏光フィルター	19
ベンゼン	11, 42, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 66, 84, 89

ほ

Bohr	22
Huygens	12
芳香族化合物	44, 45, 49, 81
防虫剤	39
防腐剤	39
補色	28, 34, 35, 36, 39, 43, 56, 88, 91, 94
蛍ルシフェリン	80
没食子酸	52
ボルネオール	70

ま

マイクロ波	18, 19
Maxwell	8, 10
Munsell	6, 34

め

メバロン酸	70
-------	----

Менделеев 23

も

網膜 33, 34, 35, 68, 69, 72, 94

モノテルペン類 70

木綿 50

や

Young 8

ゆ

有機ハロゲン化物 59

誘磁率 9, 10, 12, 13, 14, 20, 21

誘電率 10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 23

よ

陽イオン 55

陽子 22, 25, 29, 40, 92

陽子数 25

溶媒 59, 63

葉緑素 87, 88, 89, 90, 91, 95

4員環化合物 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79

ら

ランタニド金属元素 25

り

Lyman 26

リコピン 43

硫化カドミウム 39

硫化水銀 39

Rydberg 25

量子力学 8, 23, 25, 30, 92

りん酸 70, 71

れ

励起状態 40, 42, 44, 49, 58, 65, 67, 68, 69,
75, 87, 88, 92, 93

レチナール 68, 69, 71

Lenard 73

ろ

ローダミン 81, 82

六炭糖 86, 87

ロドプシン 68, 69, 71, 94