

2. 粒子の性質と波の性質を持つ光

飛び込んだ蛙の運動エネルギーを伝える波

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錦織のように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。このように考えてきますと始めに、光がどんな性質を持っていて、物質にどんな影響を与えるか知る必要があるように思います。

人間は古くから闇を恐れ、光に興味を持って来ましたから、多くの宗教に大きな影響を与えて寺院や教会では種々の光の演出がなされてきました。Young や Maxwell や Newton や Einstein などの多くの物理学者が光について研究し導き出した結論によれば、光には波の挙動による現象と粒子による現象が観測されますので、光は電磁波の一種であり波の性質を持つとともに、非常に小さな粒子の性質も併せ持つとまとめられました。このように光などの電磁波が波と粒子の二重性を持つことは量子力学により合理的に説明できるようですが、著者にとっては非常に難しく完全には理解できません。しかし実質的には、電磁波に関する種々の現象を波の性質で説明しても、粒子の性質で説明しても良いという著者の独善的な解釈が許されるように思っています。そこで、始めに波の現象について改めて考えてみようと思います。身の回りには池や海の波や音や地震やサッカースタジアムの応援席など多くの波の現象を見つけることができますが、水面に立つ波が最も観察し易いと思いますので、この水面波で波の挙動を考えて見ましよう。

古池に蛙が飛び込むときには、水の音がするとともに水面には波が立ちます。蛙が飛び込むとその部分の水を押しあげますが、同時に押しあげられた水が周囲の水面を押し上げ、水面には凸凹の同心円状に水面の高低が生じます。水面より高い部分の水は周囲に流れ出しますから、高い部分の外側に高い部分が移動してゆき、水面は元の状態に戻ります。結果として、水はわずかに移動するだけですが、蛙が水に飛び込んだ時に生じた水面の上昇は蛙の飛び込んだ場所から次々に外側に伝わってゆきます。古池の水面のある一点では水位が一時的に上がり位置エネルギーが増加しますが、間もなく水位は元の状態に戻りますから位置エネルギーも失われて元に戻りエネルギーの増減はありません。蛙の持っていた運動エネルギーは水の上下運動の伝播に伴い、水を持ち上げる上下運動のエネルギーとなって池の畔までエネルギーを伝播してゆきますが、このエネルギーが伝わってゆく現象を波と呼んでいます。

大きな蛙が勢いよく飛び込むときには多くの水を跳ね飛ばしますから、当然飛び込んだ所の周囲で水面が大きく押し上げられ、水面には大きな凸凹が生じます。古池の水面のある一点では水位が一時的に高くまで上がり位置エネルギーが大きく増加しますが、間もなく水位は元の状態に戻りますから位置エネルギーも失われて元に戻ります。大きな蛙の持

っていた大きな運動エネルギーは大波となって、池の畔までエネルギーを伝播してゆきま
す。2004 年のマグニチュード 9.3 のスマトラ島沖地震で引き起こされた津波は極めて大き
なエネルギーを伝播し、ベンガル湾を横切って 1440 km 離れたスリランカに 40000 人以上
の死者を含む大災害をもたらしました。

蛙が飛び込むとその部分の水を押しよめますが、同時に押しよめられた水が周囲の空気
も押しよめます。押しよめられた空気は隣接している空気と押しよめ合いをして押しよめ
られますが、隣接した空気は押しよめられます。このような空気の前後の運動は次々に空気
の中を伝わってゆきま
す。このときの空気を押すエネルギーも空気の中を伝わってゆきま
す。蛙の持っていた
運動エネルギーは空気
の前後運動の伝播に伴い、水の音の波とな
って空気の中を伝わ
ってゆきま
す。蛙の持っていた運動エネルギーは古池の水面を伝わる波も空気中
を伝わる水の音もエネルギーの増減する変化として波の形で次々に伝えられてゆきま
した。これらの例からも分かるように、通常の波は水や空気などの媒体が持つエネルギーの増減
によって次々にエネルギーを伝える現象と考えることができます。

電磁波は磁場と電場の波

Faraday は電線を巻いたコイルの近くで磁石を動かすと、磁場の変化を打ち消すような
方向に電場が発生し、電流がコイルに流れることを見出しました。この現象は電磁誘導と
呼ばれ、コイルに流れる電流の電圧 V は磁場の時間的変化に比例します。ここで用いら
れるコイルの電線の巻き数 N を多くすれば、誘導される電流の強さも強くなりますから、
この電磁誘導の現象をまとめますと式 2-1 の微分式で表されます。これとは逆に、電流
の単位として名前の残っている Ampère は輪になった電線のコイルに電流を流すとその直
角の方向に磁性が発生し、この磁場の強さ B は電流量 I に比例し、電流の流れる電線から
の距離 r に反比例する式 2-2 で表すことができます。ただし μ_0 は真空中の誘磁率 (1.257
 $\times 10^{-2}$ Gm/A) を意味します。磁場にも電場にも方向性がありますが、ここで発生する磁場
と電場はそれぞれ互いに直角の方向に向きます。また、電場も磁場も空間がエネルギーを
持って変化する現象ですから、そのような場に存在する媒体には無関係で真空中においても
変化します。

$$V = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{式 2-1}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \text{式 2-2}$$

このように電場の変化と磁場の変化の間には互いに打ち消すような相互作用がありますが、電磁波はこの磁場と電場が相互に影響しあいながら規則的に変化し、伝播してゆく波の性質を持っています。水面にたつ波は水を媒体に、また音の波は空気を媒体にしてエネルギーを伝播しますが、電場や磁場の変化は媒体に無関係ですから、真空中でも電磁波はエネルギーを伝播してゆきます。また、電磁波の磁場の振動面と電場の波の振動面は電磁誘導により直交し、周期は同期されています。Maxwell はこのような磁場と電場の立体的な関係を 3 次元的に数式化して、電磁波の持つ種々の性質を論理的に合理化しました。これにより、電磁波が通過する物質の誘電率を ϵ 、誘磁率を μ とするとき、電磁波の伝播する速さ c は式 2 - 3 に示すような関係を持っていることが示されます。これらの誘電率も誘磁率も真空中では定数ですから、光の速さも定数の 299792458m/s となり 1 秒間に地球の周りを約 7 周半走ると概算されます。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad \text{式 2 - 3}$$

物質が電場の中に置かれる時に構成している分子や原子が電場を打ち消すように影響を受けて電子の偏りを起こす現象を分極といい、特に分子内に電子の偏りを持つ双極性分子が移動して整列する時には原子分極と呼ばれて大きな分極効果を示します。また、分子の中に存在する多くの電子も負電荷を持っていますから、電場に分子を置きますと電場を打ち消すように分子の中で電子が多少移動して電子の偏りを生み、分子は電場と反対の電荷を持つ電子分極が誘起されます。さらに、電場を打ち消すように分子の一部分の構造が変形して分子全体として電子に偏りを生み、分子が電場と反対の電荷を持つ配向分極を誘起します。特に、繊維を構成している高分子化合物では、長く繋がった原子の鎖が変形することも移動することも困難ですから、主鎖に結合した原子や原子団の向きや位置が若干変化する配向分極が起こります。ここで電場 E と分極により打ち消すように誘起される電場 D には式 2 - 4 の関係がありその比例定数を誘電率 (ϵ) といいます。また、分子の全くない真空の状態の誘電率 (ϵ_0) に対する割合を比誘電率 (ϵ_r) と呼んで式 2 - 4 のように定義しています。

$$D = \epsilon \cdot E \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{式 2 - 4}$$

このように電場に対する分子や原子の種々の対応により電場が打ち消されるように分極が起こります。双極子モーメントを持つ双極性物質も気体の状態では密度が低いために原子分極もあまり大きな効果を示しませんが、移動して整列する分子の密度の高い液体の場合には同じ物質でありながら分極効果が上がります。表 2 - 1 には種々の物質の原子分極と電子分極と配向分極を合わせたすべての分極による比誘電率を状態別にまとめておきます。水蒸気の比誘電率は窒素や酸素の気体と同じように密度が非常に低いためにほとん

表 2 - 1 種々の物質の誘電率と屈折率

化合物名	相	温度	誘電率	屈折率	化合物名	相	温度	誘電率	屈折率
水素	液相	-253	1.23	1.110	酢酸	液相	20	6.15	1.370
水素	気相	100	1.00	1.000	エタノール	液相	25	24.30	1.359
窒素	液相	-203	1.45	1.205	ベンゼン	液相	20	2.28	1.498
窒素	気相	25	1.00	1.000	ヘキサン	液相	20	1.89	1.372
酸素	液相	-193	1.51	1.221	エチルエーテル	液相	20	4.34	1.352
酸素	気相	25	1.00	1.000	アセトン	液相	25	20.70	1.357
氷	固相	-5	4.60	1.309	酢酸エチル	液相	25	6.02	1.370
水	液相	25	78.54	1.333	食塩	固相	20	6.12	1.516
水	液相	50	69.94	1.329	ダイヤモンド	固相	20	5.50	2.417
水	液相	100	55.33	1.318	ポリスチレン	固相	25	2.4-2.7	1.592
水蒸気	気相	0	1.01	1.000	パラフィン	固相	25	2.0-2.5	1.433
アンモニア	液相	17	16.90	1.325	水晶	固相	25	3.5-4.7	1.458
四塩化炭素	液相	20	2.24	1.459	ほう珪酸ガラス	固相	25	4.5-6.2	1.463
メタノール	液相	25	32.63	1.326	鉛ガラス	固相	25	6.5-10.0	1.613

ど 1 に近い値を示していますが、水を構成している水素原子は若干ながら正電荷を帯び、酸素原子は同じく僅かに負電荷を帯びていますから、液状の水の比誘電率は 25 において 78.54 と極めて大きな値を持っています。同じ物質でも気体と液体ではその状態に応じてその分極効果が大きく異なりますが、分子の移動が困難な固体の状態では、大きな誘電効果を示す原子分極もできません。物質を構成している分子や原子はそれらの持つ運動エネルギーとそれらの間に相互に働く結合や分子間力により対応の速さに違いがあります。運動エネルギーは温度に依存しますから、温度が低い時には分子や原子の動きが鈍くなり対応が遅くなります。分子の中の電子は 10^{-15} 秒程度、液体や気体の分子は 10^{-12} 秒程度の時間内で活発に運動しています。相互に働く結合や分子間力は相互間距離に反比例しますから、固体では分子や原子の間に強く相互作用が働くために、電場の影響で分子の構造が変形する速さは 10^{-3} 秒程度ですから、電場の変化に対応する配向分極は極めてゆっくりと起こります。

電磁波は正の電位から負の電位まで電場の強さが周期的に変化する波の性質を持っていますから、その周波数に相当する速さで電場が交互に変化します。双極子モーメントを持つ分子に電磁波を照射しますと、電磁波により分子の周囲の電場が周期的に変化します。物質を構成している分子は電磁波による電場の変化の影響を受けて、分子の持つ誘電率に相当する分極をして電場を打ち消そうとします。しかし、紫外線や可視光線は波長が短く電場の変化の周期が $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 秒程度に短いために、分子運動や分子の構造変化は電磁

波の電場の変化に追従できませんから、分子はあまり動くことも構造変化することも出来ず原子分極や配向分極による分極効果を示しません。分極により電場を打ち消す強さは式 2 - 4 の比例定数と定義していますから、分極の無いときには誘電率も真空の状態の誘電率と等しくなります。紫外線や可視光線による電場の変化に分子の中の電子は十分に追従できますから、電子分極が誘起され、 ϵ_0 よりも大きな誘電率を示します。

物質の密度やその物質を構成している分子や原子の電子状態により誘電率が変化するように、物質の密度やその物質を構成している分子や原子の電子状態により誘磁率も変化します。さらに、物質の密度やその物質に含まれる電子の状態ばかりでなく、電場の変化の速さによっても誘電率も誘磁率も変化します。しかも、物質の誘電率も誘磁率も ϵ_0 および μ_0 よりはそれぞれ必ず大きくなります。電磁波の波長や物質の密度や温度により物質の誘電率も誘磁率も変化しますから、式 2 - 3 により電磁波の早さは通過する物質により異なり、地球を 7 周半する速さよりは遅くなります。

速度が遅くなると曲がる光

古池に蛙が飛び込むとその部分の水が押しのけられますが、同時に押しのけられた水が周囲の水面を押し上げ、水面には凸凹の同心円状に水面の高低が生じます。水面より高い部分の水は周囲に流れ出しますから、高い部分の外側に高い部分が移動してゆき、水面は元の状態に戻ります。結果として、水はわずかに移動するだけですが、水を伝播する波の速度は同じですから、蛙が水に飛び込んだ時に生じた水面の上昇は図 2 - 1 (A) のように蛙の飛び込んだ場所から同心円状に次々に外側に伝わってゆきます。材木を池に投げ込みますと、水面には棒状に凸凹が生じます。図 2 - 1 (B) のように山脈のように連続している高い部分を持つ波は、そのあらゆる高い部分を中心とする円の接線を結んだ包絡線に移動し、波が伝播してゆくことを Huygens が見出しました。Huygens の見出した法則によれば「く」の字に

曲がった波からは図 2 - 1 (C) のように伝播してゆくと思われ

ます。伝播する速度が変化する時には、速度の速い媒体では大き

な円を描いて進みますが、速度の遅い部分では小さな円を描いて進みます。ある線を境に波の伝播速度が遅くなる場合には図 2 - 2 に示すように、それぞれの描く円が小さくなりますから接線を結んだ包絡線は曲がり、波の進行方向も曲がってしまいます。

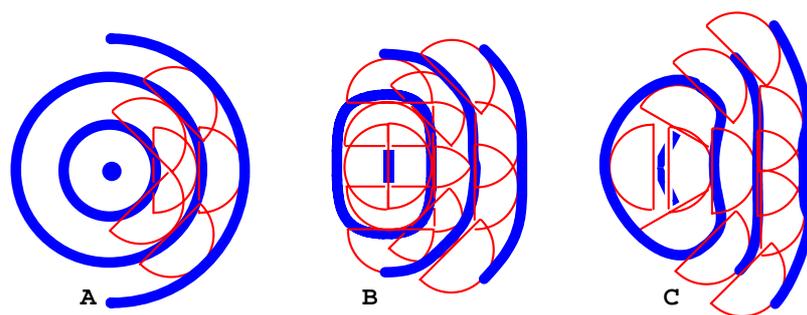


図2 - 1 波の伝播の仕方

電磁波は電場と磁場が周期的に変化する波の性質を持っており、真空中では1秒間に地球を7周半する速度を持っています。しかし大きな誘電率と誘磁率を示す物質の中ではその速度は遅くなります。分子の密度が小さいために誘電率も誘磁率も小さな空気中から電磁波が水面を通過して密度が高く誘電率の高い水の中に入る時

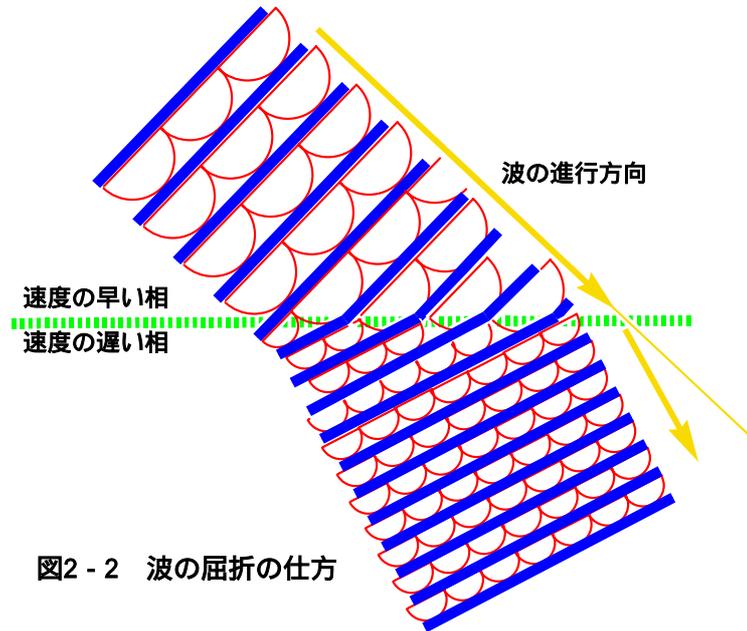


図2 - 2 波の屈折の仕方

には、式 2 - 3 に従い電磁波の速度が遅くなりますから、図 2 - 2 のように水面で波の進行方向が曲がります。この現象を屈折といい、真空中に対する屈折の大きさを屈折率と呼んでいます。真空中の誘電率と誘磁率をそれぞれ ϵ_0 と μ_0 、電磁波が通過する物質の誘電率と誘磁率をそれぞれ ϵ と μ としますと、屈折率 n は式 2 - 5 のように電磁波がそれぞれの物質中を伝播する速度の比で表されます。ただし、物質中の電磁波の伝播速度は v とします。また、オランダの数学者の Snell は 2 種の媒体を電磁波が通過して屈折する時には、その屈折率 n_{AB} が 2 種の媒体の界面に対する入射角 θ_A と屈折角 θ_B に対して式 2 - 6 で表されることを見出しました。ナトリウムの炎色反応で観察できる橙色の D 線(波長 589.3nm、 5.893×10^7 m) の光に対する種々の物質の屈折率を表 2 - 2 に誘電率とともに掲げておきました。

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad \text{式 2 - 5}$$

$$n_{AB} = \frac{n_B}{n_A} = \frac{v_A}{v_B} = \frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} \quad \text{式 2 - 6}$$

図 2 - 3(A) に示す板ガラスのように厚さの等しい平板を電磁波が通過する場合には、入射すると屈折しますが、物質から出る時に再び屈折しますから、通過の前後で光路の方

向は変化しません。図2-3(B)に示すように厚さが等しくないレンズ状の物質を電磁波が通過する場合には、接線が平行でなくなりますから、光路の方向は変化します。ガラスは空気より大きな屈折率を持っているから、このよう

な光路の変化が起こり、窓ガラスに利用されるばかりでなく光学レンズなどに広く用いられています。

前節で述べたように誘電率も誘磁率も物質の密度や温度により変化しますから、屈折率もこれらの影響を受けます。空気は温度が高くなれば密度が小さくなりますから、屈折率が小さくなります。砂漠などで太陽により地表が熱せられますと、地表付近の空気は密度が小さくなりますが、上空の空気はあまり温度の上昇がなく密度も比較的に大きなままになっています。当然、上空に向かった光は地表と上空の間で屈折をして再び地表に曲がって帰ってきますので、このような空気による光の屈折により非常に遠くの景色が近くに観測される現象として蜃気楼が現れます。

紫外線や可視光線などの光が持つ電場の変化の早さに比較して、誘電率や誘磁率に影響を与える原子や電子の移動が遅いために、通過する電磁波の波長あるいは周波数によって誘電率も誘磁率も影響を受けます。光の波長に対する水晶と食塩と塩化カリウムとフッ化カルシウムと水の屈折率の変化を図2-4に示しておきますが、光が物質を通過するとき

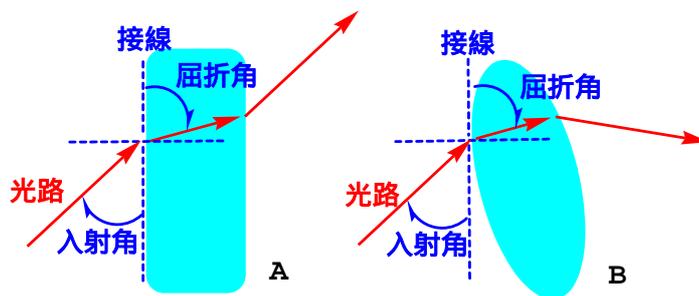
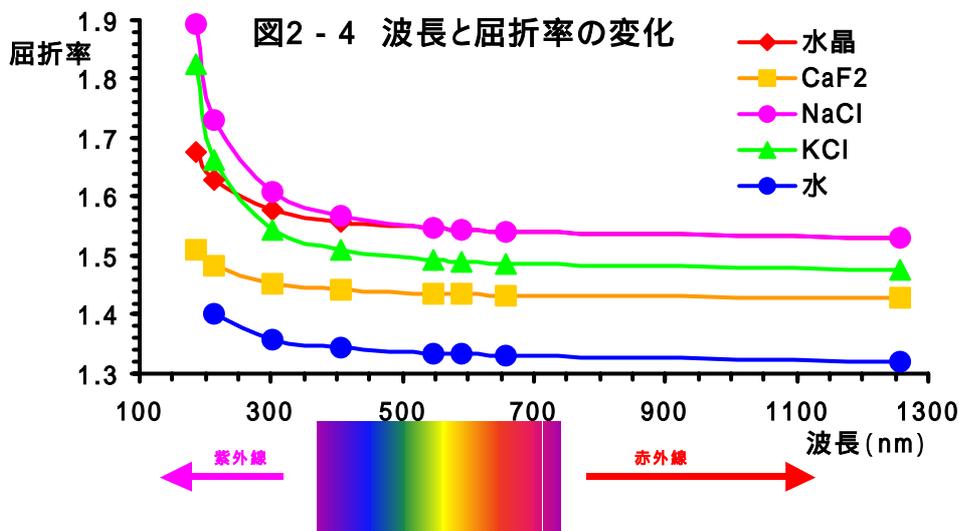


図2-3 レンズで屈折する光路



にその光の波長が短いほど屈折率の大きくなる傾向が見られます。400～430nm ($4.0 \times 10^{-7} \sim 4.3 \times 10^{-7} \text{m}$) の波長の紫色の光から 610～730nm ($6.1 \times 10^{-7} \sim 7.3 \times 10^{-7} \text{m}$) の波長の赤色の光までが可視光線ですが、この領域でもわずかながら屈折率の変化が認められます。

水滴に可視光線が入射しますと図 2 - 5 (A) のように屈折しますが、紫色の光と赤色の光は波長が違いますから、屈折率に差異が生まれ光路の方向が異なってきます。夕立の後に図 1 - 2 に示すように東の空にはしばしば虹を見ることが出来ますが、これは西の空に傾いた太陽からの光が東の方で未だに降っている夕立の雨粒に当たり、屈折して光路が変わるとともに図 2 - 5 (A) のように分光して目に届く時に虹として見えます。当然、可

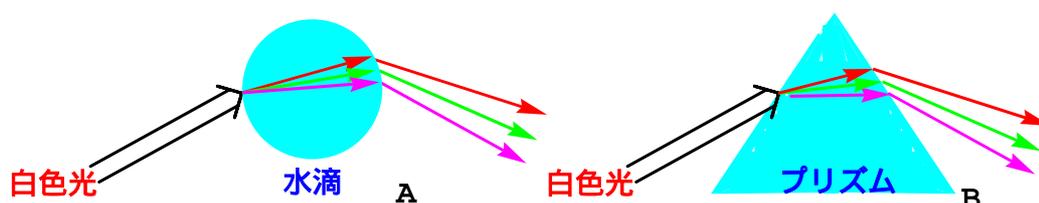


図2 - 5 レンズで屈折する光路

視光線の中で最も波長の短い紫色から最も波長の長い赤色の光まで波長の長さに対応して順次光の来る角度が変化しますから、虹は 7 色の帯に見えます。球状の物質でなくても通過する媒体が平板でなければこのような屈折率の違いにより白色光は虹色に分光します。このように光を分光し波長の順に光の虹色に並んだ帯をスペクトルと呼んでいます。無色の紫外線や赤外線でも同様の帯を得ることができ、それらも紫外スペクトルあるいは赤外スペクトルなどと呼んでいます。3 角形のプリズムは水晶やガラスなどで容易に作ることができますから、図 2 - 5 (B) と図 2 - 6 のように種々のスペクトルが広く研究や医療の検査などに用いられています。また、複雑な面を作るようにガラスを削り磨きますと、光が複雑な方向に屈折しスペクトルを作りますから、カッ



図2-6 プリズムによる分光

トガラスやシャンデリアとして生活を飾るようになっています。さらに、ダイヤモンドやアメジスト（水晶）やチタニアなどの屈折率が大きく透明度の高い石の表面を非常に複雑に削り磨きますと、白色光が色々な面でスペクトルに分光しますから、キラキラと7色に輝き、女性の心を捉える宝石になります。

波長の長さで変わる光エネルギーの大きさ

光のエネルギーに対して Newton は式 2 - 7 に示す粒子の運動による運動エネルギーの関係式を適用して説明を試みましたが、後に明らかになったのですが光の粒子が質量を持たないために、式 2 - 7 で $m = 0$ になるために Newton 力学では表現することができませんでした。Einstein はフォトン（光子）と呼ばれる粒子が波の運動をしながらエネルギーを伝播してゆくと仮定し、Planck の定数 h を比例定数としそのフォトン 1 個の持つエネルギーが式 2 - 8 のように電磁波の振動数 ν に対して比例することを導きました。電磁波の振動数は真空中では波長に反比例しますから、真空中の光の速さと波長をそれぞれ c および λ としますと式 2 - 8 が書き換えられ、電磁波の持つエネルギーが波長の短いほど大きいことも導かれます。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{式 2 - 7}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{式 2 - 8}$$

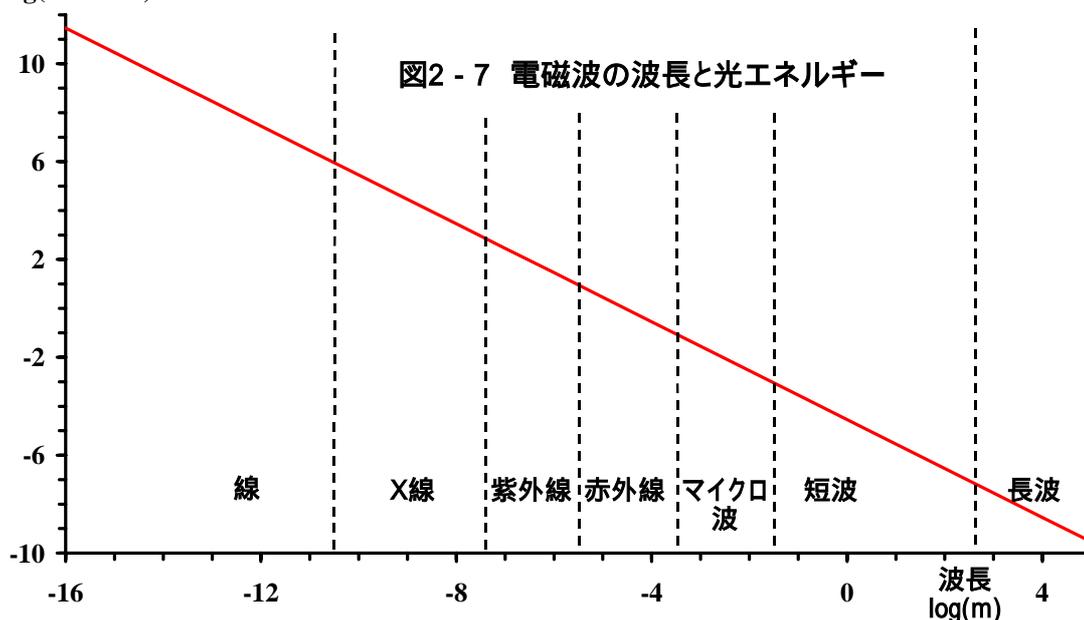
古池に蛙が飛び込むとその部分の水を押し上げますが、同時に押し上げられた水が周囲の水面を押し上げ、押し上げられた水は周囲に流れ出しますから、高い部分の外側に高い部分が移動してゆき、蛙が水に飛び込んだ時に生じた水面の上昇は蛙の飛び込んだ場所から徐々に外側に伝わってゆきます。蛙の持っていた運動エネルギーは水の上下運動の伝播に伴い、水を持ち上げる上下運動のエネルギーとなって池の畔までエネルギーを伝播してゆきます。大きな蛙が勢いよく飛び込むときには大きな蛙の持っていた大きな運動エネルギーは大波となって、池の畔までエネルギーを伝播してゆきます。このように水面の上を伝播する波の持つエネルギーは振幅と呼ばれる波の高さに比例します。これに対してフォトンには波の性質を持っていませんけれども水面を伝播する波と異なり、式 2 - 8 で表されるフォトンの持つエネルギーはその振動数に比例し波長に反比例しますが、波の高さを意味する振幅には関係しません。

同じ波長の光が同じ光のエネルギーを持っているにもかかわらず、冬の太陽の光は弱々しく、夏の太陽の光はキラキラと強く輝いています。このことは電磁波が単なる波では完全には説明できず、同じエネルギーを持つフォトンの量あるいは密度により電磁波の強さが変化するものと考えられます。実際、振動数の大きな電磁波を物質に当てると電子やイオンをはじき出す光電効果という現象が起こりますが、このときはじき出される電子やイ

オンの量は振動数には無関係で電磁波の強さに比例します。このことから光子は波の運動をしながら走る重量を持たない粒子であると考えられ、その光子は振動数に比例する一定のエネルギーを持っています。その光が持つ総エネルギー量はその光子の数に比例しています。冬の弱々しい太陽の光は一定時間の内に到達する光子の数が少なく、夏のキラキラと強く輝く太陽の光には多くの光子が含まれています。

紫色と赤色のそれぞれ 400nm ($4.0 \times 10^{-7}\text{m}$) と 700nm ($7.0 \times 10^{-7}\text{m}$) の光の波長を式 2-8 に代入してみますと、光子 1 個の持つ光エネルギーはそれぞれ 11.86×10^{-23} kcal および 6.78×10^{-23} kcal と計算できます。光子と同じように分子も非常に小さな粒子ですから、物理学や化学の分野ではモルという単位で物質の重さや性質と分子の関係を表しています。Avogadro が明らかにしたように 1 モルに含まれる粒子の数は 6.022×10^{23} 個ですから、1 モルの光子が持つ紫色と赤色の光のエネルギーはそれぞれ 71.44 kcal と 40.82 kcal と計算されます。さらに、真空中の電磁波の波長に対する電磁波の 1 モルの光子が持つエネルギーの変化を図 2-7 に示しておきます。このように電磁波の波長によりその光子が持つエネルギーが大きく異なりますから、種々の電磁波がその波長により 9 種の電磁波に実用的に大別されています。

光エネルギー
log(kcal/mol)



それらの関係は表 2-2 にまとめたように、最も波長の短くエネルギーの高い 線は放射性物質から発せられる放射能と考えられている電磁波ですし、 $0.1 \sim 10\text{nm}$ ($10^{-10} \sim 10^{-8}$ m) の波長を持つ電磁波は X 線と呼ばれています。一般に、 $100\text{nm} \sim 100\mu\text{m}$ ($10^{-7} \sim 10^{-4}$ m) の波長の電磁波を光と呼んでいますが、人間が目で感じることのできる光は特に可視光線と呼ばれ、 $400 \sim 800\text{nm}$ ($4 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-7}\text{m}$) の波長領域に限られています。また、可視光線よりも波長の短い光を紫外線、波長の長い光を赤外線と呼んでいます。光よりも

さらに波長の長い電磁波は電波と呼ばれていますが、それらの電波には電磁波の性質によりマイクロ波と極超短波と短波と長波に分類されています。線やX線や紫外線などの波長の短い電磁波は非常に高いエネルギーを持っていますし、赤外線や各種の電波は小さなエネルギーしか持って居ないことが分かります。ちなみに、水の分子を構成している酸素-水素結合の結合エネルギーは111kcal/molと見積もられていますから、紫外線から可視光線の光エネルギーに相当しています。このように波長領域により電磁波の持つエネルギーが異なりますから、電磁波を照射したときに起こる物質に対する影響や挙動はこれらの線とX線と光と電波により非常に異なっているように思われますが、同時に多くの共通性

表2-2 電磁波の波長とエネルギーと物質に対する現象

波長 (λ)		振動数 (ν)	電磁波の種類	光エネルギー	物質に対する物理現象
(m)		(Hz)		(kcal/mol)	
10^{-16}		3×10^{24}	線	2.86×10^{11}	原子核の変化
10^{-15}		3×10^{23}		2.86×10^{10}	
10^{-14}		3×10^{22}		2.86×10^9	
10^{-13}		3×10^{21}		2.86×10^8	
10^{-12}	1pm	3×10^{20}		2.86×10^7	
10^{-11}		3×10^{19}		2.86×10^6	
10^{-10}	1A	3×10^{18}	X線	2.86×10^5	電子の励起
10^{-9}	1nm	3×10^{17}		2.86×10^4	
10^{-8}		3×10^{16}		2.86×10^3	
10^{-7}		3×10^{15}	紫外線	2.86×10^2	共有結合の励起
10^{-6}	1 μ m	3×10^{14}	可視光線	2.86×10	
10^{-5}		3×10^{13}	赤外線	2.86	共有結合の運動
10^{-4}		3×10^{12}		2.86×10^{-1}	
10^{-3}	1mm	3×10^{11}	マイクロ波	2.86×10^{-2}	分子の運動
10^{-2}	1cm	3×10^{10}		2.86×10^{-3}	
10^{-1}		3×10^9	極超短波	2.86×10^{-4}	
1	1m	3×10^8		2.86×10^{-5}	
10		3×10^7	短波	2.86×10^{-6}	
10^2		3×10^6		2.86×10^{-7}	
10^3	1km	3×10^5	長波	2.86×10^{-8}	
10^4		3×10^4		2.86×10^{-9}	
10^5		3×10^3		2.86×10^{-10}	

も見られるものと思われます。

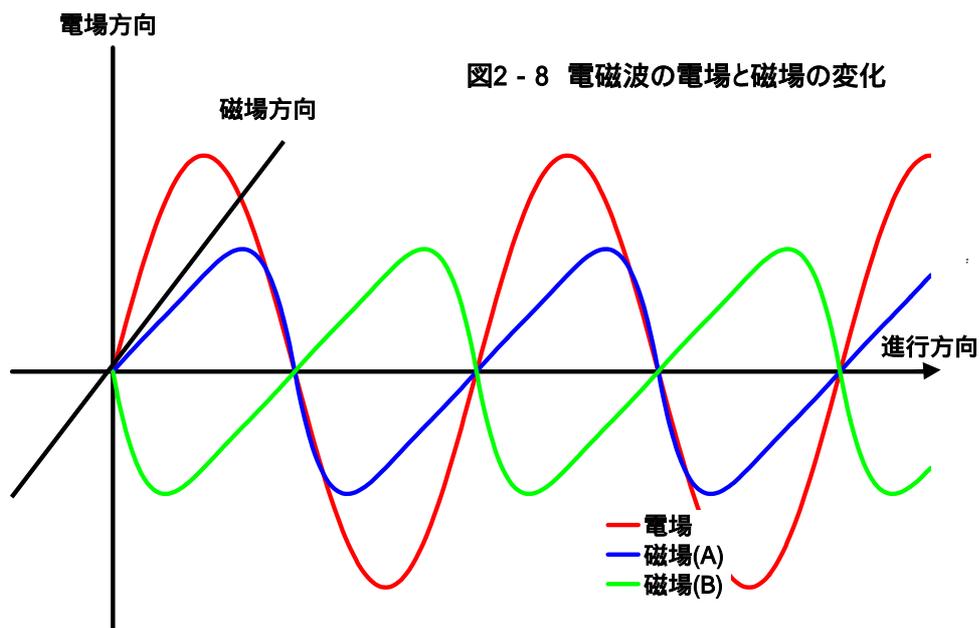
可視光線の波長をさらに詳細に見てみますと、400～430nm ($4.0 \times 10^{-7} \sim 4.3 \times 10^{-7} \text{m}$) の波長の光は多くの人間にとって紫色に感じられますし、610～730nm ($6.1 \times 10^{-7} \sim 7.3 \times 10^{-7} \text{m}$) の波長の光は赤色に感じられます。さらに、紫色と赤色の光に挟まれた波長領域も波長がわずかずつ長くなるに従って、青色から青緑色、緑色、黄緑色、黄色、橙色への連続的な色の変化が感じられます。このように可視光線の波長変化に伴う色の变化した帯をスペクトルと本来呼んでいましたが、科学の進歩に伴い紫外線や赤外線領域とも実質的に連続して電磁波の性質の徐々に変化して行くことが明らかになってきましたから、近年では広い波長領域での変化もスペクトルに含めるようになってきました。

右に磁場を持つ光と左に磁場を持つ光

電磁波は重量を持たない光子と呼ばれる粒子が真空中では1秒間に地球を7周半する速さで走る現象と考えられ、磁場と電場が相互に影響しあい規則的に変化する波の運動をしながらエネルギーを伝播してゆきます。このとき、光子はその波の振動数に比例する一定のエネルギーを持っていますから、電磁波の性質がその振動数あるいは波長に影響され、その大小により 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波、短波、長波などに分けられています。通常、これらの電磁波では個々に進行方向に対して直交する振動面を持って振動する電場の波によりエネルギーが伝達されます。光束などのように電磁波の集合した場合には電場の振動面があらゆる角度を取っているために、電場の変化が互いに打ち消されて全体として電場が現れません。

しかし、この通常の電磁波がその振幅に比較して非常に狭い隙間しか持たない縞目状の物質の中を通過するときには、縞目に対して振動面の平行な電磁波はこの物質を通過できませんが、縞目に対して直交した振動面を持つ電磁波は縞目に衝突してしまい通過することができません。当然、偏光と呼ばれる一方向の振動面のみを持つ電磁波だけがこのような縞目を持つ物質を通過してきます。電磁波の性質を持つ可視光線の場合に、トルマリンはこのような縞目を持つ天然産の物質として働きますが、10月の誕生石としても知られる宝石ですから、安価に偏光を作り出すことができませんでした。ヨウ素等のように長い分子の形をした色素を混ぜ込んだプラスチックの塊を引き伸ばしますと、引っ張る力に影響されて色素分子は極めて細く緻密な縞目状に整列します。このようにして作られた極めて細く緻密な縞目を持つプラスチックは偏光フィルターと呼ばれて、可視光線を通過させますと偏光を安価に作り出す性質を持っています。

光子は電場が図 2-8 の赤線のように規則的に変化する波の運動をしながらエネルギーを伝播してゆきますが、そのとき電場の変化に従って磁場が電磁誘導されます。ここで誘起される磁場の波の振動面は電場の波の振動面に直交し、周期は同期されています。しかし、光子には正負の2種のスピン量子数があるために、電場の振動面に対して図 2-8 (A) のように左に直交した磁場を誘起する光子と図 2-8 (B) のように右に直交



する光子が同じ割合で混ざっています。そのため光束などのように電磁波の集合した場合には電場が一方向に揃った偏光においても、磁場の振動面が左右互いに打ち消されて全体として磁場を示しません。

原子の内部では原子核の周囲を電子が動き回っていますが、物質はそのような原子が様々な並び方で種々の組み合わせで集合しています。電磁波は電場と磁場が周期的に変化する波の性質を持っており、大きな誘電率と誘磁率を示す物質の中ではその速度は遅くなります。分子の密度が小さいために誘電率も誘磁率も小さな空気中から電磁波が誘電率の高い物質の中に入る時には、液面で波の進行方向が屈折して曲がりますが、物質により原子の分布や電子の密度が異なりますから、その屈折率は異なってきます。

電磁波の光子には正負の2種のスピン量子数があるために、電場の振動面に対して左に直交した磁場を誘起する光子と右に直交する光子が同じ割合で混ざっており、電場の振動面が一方向に揃った偏光の場合にも、磁場の振動面が左右同じ割合で混ざっています。このような左右同じ割合で磁場の振動面を持つ偏光が分子内に対称性を持たない分子の中を通過するときには、磁場が左の振動面を持つ光子と右の振動面を持つ光子では誘起される誘電率にも誘磁率にも違いが生じます。そのために両方の光子では屈折率に違いが生まれますから、偏光の電場の振動面が回転してしまいます。この現象を旋光といい、分子内に対称性を持たないために旋光を引き起こすこのような物質を光学活性物質と呼んでいます。

例えば、分子式が $C_4H_{10}O$ のアルコール類には図 2 - 9 に掲げるように5種類のブタノールの異性体が存在します。この図では水酸基 ($OH-$) の結合して中心となる炭素原子を黒く表示していますが、その黒色の炭素に2個の水素原子が結合した *n*-ブタノール(N) と *i*-ブタノール(I) のほかに、水素原子の1個結合した *s*-ブタノールと水素原子の結合していない *t*-ブタノール(T) が存在します。このように4種類のブタノールは同じ元素組成

を持っていますが、それらの原子が異なった結合の仕方をしていいますから、ブタノールを構成している原子の分布もそれらの原子の内部を動き回っている電子の分布も異なります。当然、それぞれのブタノールは原子の分布や電子の密度が異なりますからその屈折率は異なってきます。

さらに、*s*-ブタノールでは黒色に表示した炭素原子に水素原子と水酸基 (OH-) とエチル基 (C₂H₅-) とメチル基 (CH₃-) の4種の異なる原子や原子団が3次的に結合していますから、前後と上下と左右の3方向で原子の配置がそれぞれ異なります。そのため、これらの *s* ブタノールにおける原子の配置や電子の分布の状態には全く対称性がありま

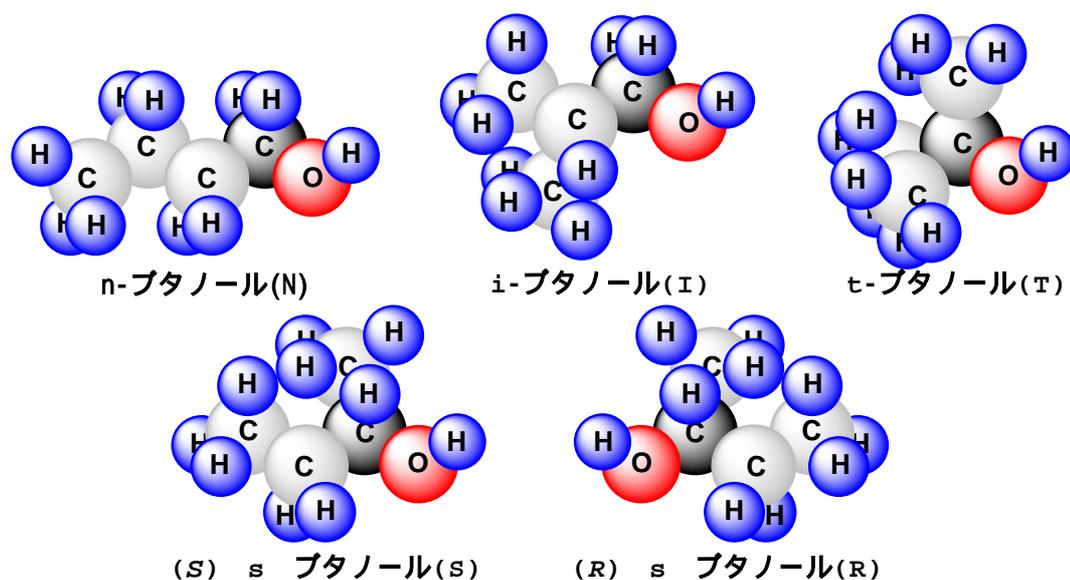


図2-9 ブタノールの5種の異性体

せんから、旋光性を示します。しかも、これらの異なる4種の原子や原子団の相対的な位置の違いから、図2-9に示すように原子の配置や電子の分布の状態が右手と左手の関係と同じような鏡像の関係にあるS型の*s*-ブタノール(S)とR型の*s*-ブタノール(R)の2種の光学活性体が存在します。これらの*s*-ブタノールのように、鏡像の関係にある2種の分子は鏡像の関係を保ちながら旋光を引き起こしますから、一方の分子が持つ旋光の方向は他方の分子が持つ旋光の方向と反対の関係になります。

フォトンには正負の2種のスピン量子数があるために、電場の振動面に対して左に直交した磁場を誘起するフォトンと右に直交するフォトンが同じ割合で混ざっており、磁場の振動面が左右同じ割合で混ざっています。このような左右同じ割合で磁場の振動面を持つ偏光が分子内に対称性を持たない光学活性物質の中を通過するときには、磁場が左の振動面を持つフォトンと右の振動面を持つフォトンでは誘起される誘電率にも誘磁率にも違いが生じますから、電場の振動面が回転する旋光の現象を示します。