

■ 光（電磁波）について



はじめに

多くの分析には光を含む電磁波が利用されています。電磁波は我々の生活の中のあらゆる分野で利用され、我々を含む生物が生存するために必要な情報やエネルギーを提供してくれます。主に太陽からの電磁波が降り注ぐ地球上での生命は、それらを有効に活用できるように姿や成長、生存の仕組みを作り上げてきました。今回は、生命に必須であるとともに、私たちの生活や弊社の生業である科学分析においても欠かせない光について考えてみることにします。

光の概念

光は波長によって分別できるということは目に見える色から理解できますが、光を存在しているものとして頭に描くのは難しいことです。光は波と粒子の両方の性質を持っているといわれますが、具体的にどうイメージすればいいのでしょうか。一般的には図1のように電場と磁場が直交した波の形で説明されます。電磁波の真空中で進む速さ（伝播速度）は光の速さで等しいこと、現在の理論では電磁波の質量はゼロでありエネルギーのみの存在

であること、物質に作用し発熱や反応を引き起こすことなどが知られています。私たちは、その機能を多くの技術に利用し生活に活用しています。

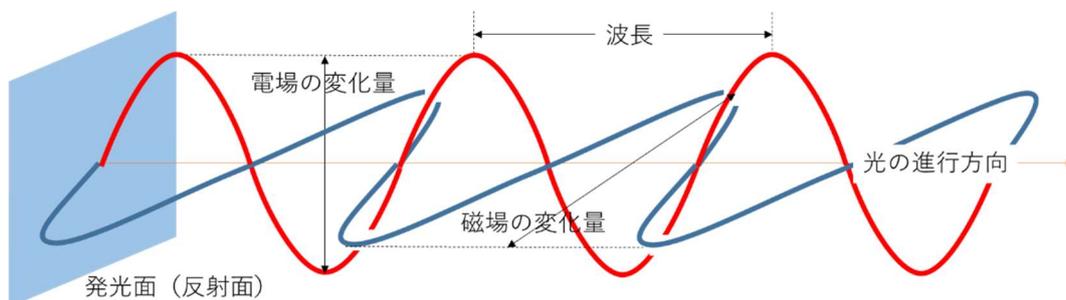


図1 電磁波の概念

電磁波の一部は視覚で認識されるものとして、カメラや望遠鏡、顕微鏡など発生する光を捉える装置や、分光光度計などの定量機器に利用され、高エネルギーの X 線はその生体透過性を利用したレントゲンとなり、さらに高エネルギーの γ 線は生体構成分子を切断し生物に致命的なダメージを与えます。赤外よりも長波長域では、加熱に利用されるマイクロ波となり、さらに波長がミリメートルから数万キロメートル以上の電磁波は電波として利用されます。波長が短いほど粒子性が強くなり、波長が長くなると波動性が表れるといわれています。量子力学ではあらゆる物質は粒子性と波動性の両方を併せ持つとされていて、とらえどころのない電磁波ですが、数字と視覚の仕組みから眺めてみます。

電磁波のエネルギーについて

電磁波のエネルギーは波長によって決まります。波長のエネルギー強度は $E = hc/\lambda$ の数式で算出できます (E : エネルギー、 h : プランク定数 6.63×10^{-34} Js、 c : 光の速度 3.00×10^9 m/s、 λ : 波長 m)。太陽からの電磁波のエネルギーは $10^{-13} \sim 10^{-23}$ ジュールと 10 桁以上の幅がありますが、最もエネルギーの高い γ 線にしても 10^{-13} ジュール程度でありその数値だけを見ると決して強くないように見えます。しかしながら、炭素-炭素共有結合の解離エネルギーは 348 kJ/mol で、分子中の一つの C-C 結合が解離するのに必要なエネルギーは 5.78×10^{-19} ジュールであり、原理的には γ 線の電磁波 (光子) 一個で約 100 万個の C-C 結合を切断できることとなります。紫外線では約 1~3 個なので、 γ 線が有機化合物でできている生体に与える影響は甚大であろうと想像できます。但し、生体分子は水に取り囲まれ水を包含しているため、 γ 線によって生体内で起きることの大部分は水分子の放射線分解で、ヒドロキシルラジカル (OH ラジカル) や水の正イオン (H_2O^+)、H 原子を生じます。それらの活性分子が 200~300 nm 以内の距離にある有機化合物と反応

し、生体分子の不可逆的変化を引き起こします。太陽からの電磁波の波長とエネルギー強度を図2に示します。

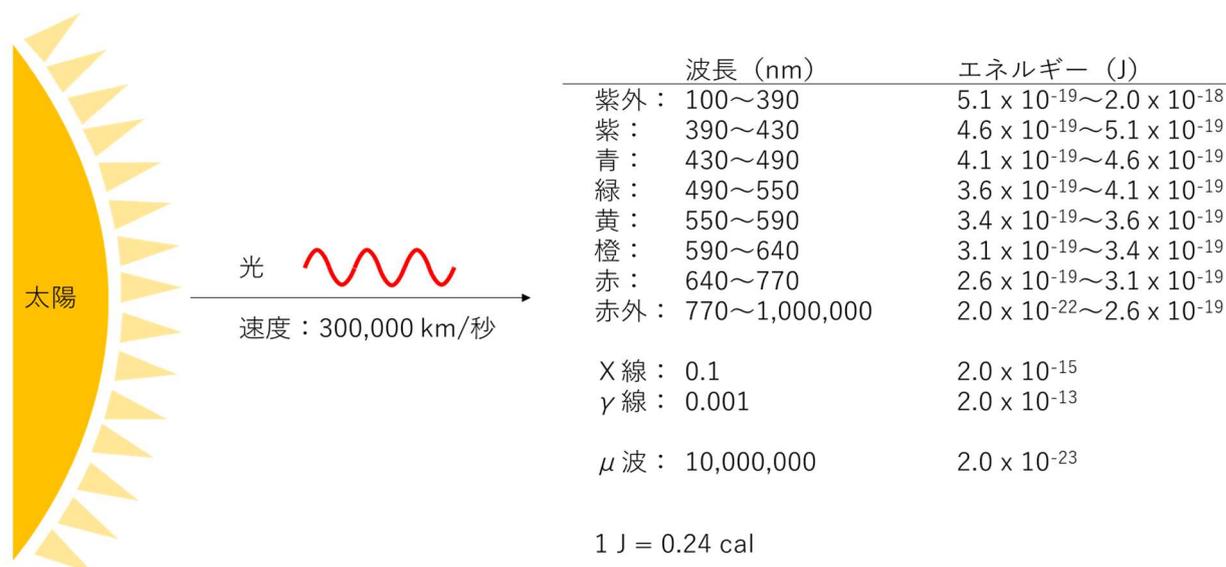


図2 電磁波の波長とエネルギー強度

太陽からの電磁波で紫外線よりも波長の短いものはオゾン層によりカットされて地表に届くため、その影響はほとんどありません。また、生物は長い時間をかけて電磁波が降り注ぐ地球の環境に対応できるように仕組みを整えてきたので影響が少ないともいえます。

人が捉える電磁波の姿

光は粒子の性格も併せ持つことから光子や光量子と呼ばれます。光子が粒子の形を取っていれば、特定のエネルギーと運動量を持って真空中を光の速さで直線的に進む姿が想像できます。しかしながら、現在の理論では光子は質量がなくエネルギーのみを持つとされています。光の性質を利用して存在を確認する方法は数多くありますが、人が視覚で光を捉える仕組みについて見てみることにします。

多くの生物は光を情報として捉える仕組みを持っています。その大部分が目を経由しています。人の目の網膜にある視細胞には赤錐体（L錐体）、緑錐体（M錐体）、青錐体（S錐体）の三種類の錐体細胞があり、赤錐体は長波長域、中波長域、短波長域の光によって各細胞中のタンパク質（オプシンタンパク-レチナール複合体）が刺激をうけてシグナルを発生し、視神経を通して脳に送られ処理されて色として認識されます。また、錐体細胞に加えて数多くの桿体細胞があり光刺激の強弱を捉えます。複合体としてよく知られているのはロドプシンで、光によってロドプシン内のシス型レチナールがトランス型となること

でタンパクから外れます。それが引き金となって細胞内シグナル伝達を経て最終的には視神経を経由する信号となり脳に到達します。

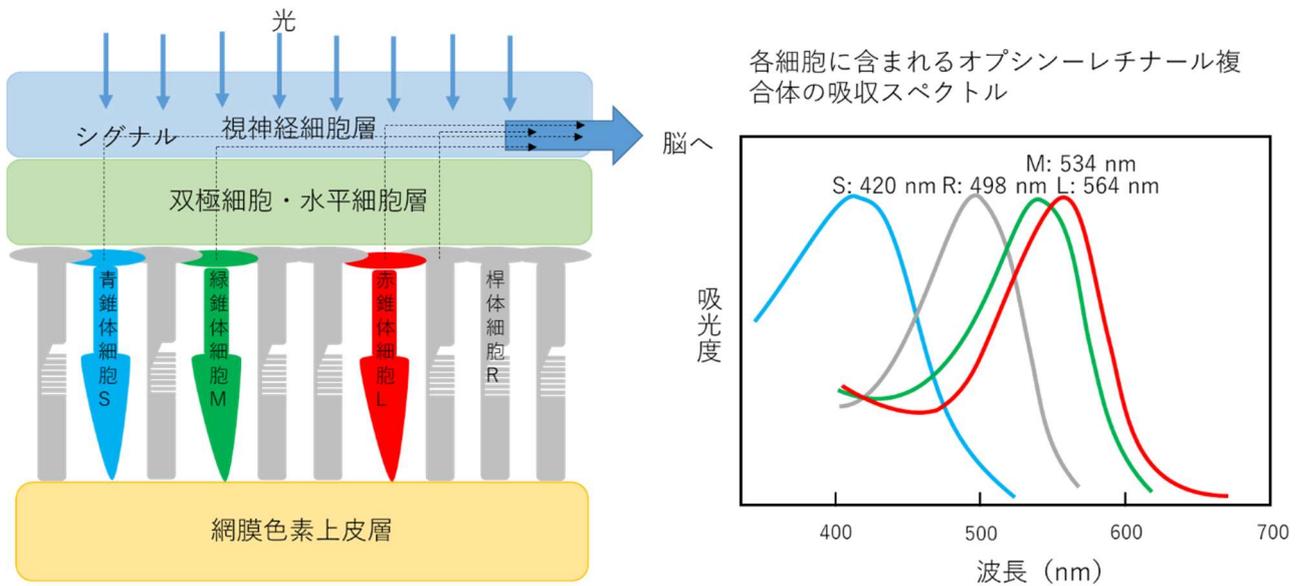


図3 人の網膜の細胞構造と視物質（オプシンとレチナール複合体）の吸収スペクトル

錐体細胞と桿体細胞は特殊な構造をしており、特に桿体細胞は1個の光子に反応するといわれています（図3）。細胞中にあるオプシタンパクに結合しているシス型レチナールは光を受けてトランス型に構造変化し（図4）、それによってオプシタンパクから外れタンパク質の構造が変化します。オプシタンパク中でのレチナールのシス体からトランス体への構造変化は0.2ピコ秒以下で、反応の量子収率は0.6~0.7とされており、光子1個でレチナール-オプシタンパク複合体を活性化させるためには、 $0.65 \times 4 \times 10^{-19}$ (498 nmの場合) = 2.6×10^{-19} J 程度のエネルギーでシスからトランスへ異性化する必要があります。因みに、生体エネルギーの源であるATP1分子のエネルギーは 8.3×10^{-20} J なので、約ATP3分子分のエネルギーに相当します。

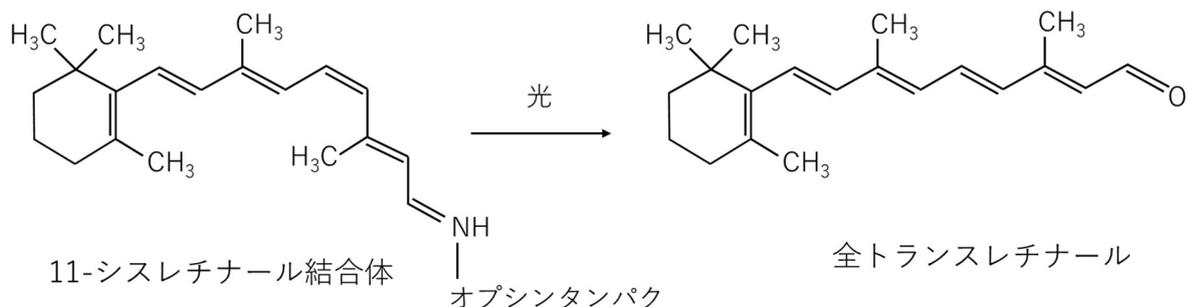


図4 光によるレチナール分子の構造変化

オプシン-レチナル複合体は S 錐体細胞、M 錐体細胞、L 錐体細胞、桿体細胞ごとに最大吸収波長があり、その波長に近い光子に応答します。複合体のレチナル分子がシス体からトランス体へと変化することで、オプシタンパクから外れ、タンパクの構造変化をきっかけとして cGMP トランスデュースンの活性化、次いでホスホジエステラーゼの活性化による細胞内 cGMP の濃度低下によって、cGMP 依存性のカチオンチャネルが閉じて細胞内へのカチオン流入が止まり、細胞が過分極します。この過程でレチナル 1 分子の構造変化は数万の cGMP 分子の分解となって増幅されます。それが視細胞からの信号となり双極細胞・水平細胞を経て視神経細胞を活性化したシグナルが脳へ送られた結果、光は色として感知されることになり、膨大な量の情報から色彩や明暗に組み上げて形と動きとして認識します。視覚を持つ生物が光子のエネルギーに的確に応答する分子としてレチナルを選択していることは興味深いことです。

眼という器官を持たない微生物もバクテリオロドプシンと呼ばれるレチナルを含むタンパク質を持っており、光によるエネルギー代謝に関与しています。微生物のロドプシンと哺乳類のロドプシンとはそのアミノ酸構造が異なっており、生物進化の過程で眼の仕組みの中に組み入れられたものではなく、別々に進化してきたものと考えられています。

光子の数と視細胞の反応

電磁波は粒子と波動の性質を併せ持つエネルギーであることをイメージすると、視覚で捉えている光も連続ではなく不連続の光子としてレチナル-オプシン複合体に衝突することになります。例えば、555 nm の光による 1 ルクスの照度から径 6 ミリメートルの瞳孔に入る光子の数は、一秒あたり約 1×10^{11} 個と算定でき、それらはレンズと水晶体を通り網膜の視細胞に届くことになります。網膜の桿体細胞数は約 1 億個、錐体細胞数は約 500 万個で、各視細胞には一秒あたり約 1000 個の光子が届くことになります。また、桿体細胞は光子 1 個に反応し、錐体細胞では光子 100 個が必要といわれています。視覚反応時間は 180~200 ミリ秒なので、単純に計算すると、1 ルクスの照度は桿体細胞が反応するには十分な光子数、錐体細胞にとっては色の区別が付くか付かないか程度の光子数であるといえます。以上のことから、人は 0.2~0.5 ルクス程度の月明りでも物体の輪郭を明瞭に認識できることが理解できます。また、ロドプシンのレチナル分子のシス体からトランス体への異性化反応の時間は 0.2 ピコ秒であることから、分子は光を連続したものではなく不連続のエネルギーの塊として捉えるに十分な感度であることが分かりますが、我々の視覚反応時間では光を粒子として捉えることはできません。

おわりに

オプシン-レチナール複合体の直径を 10 nm とした場合、その複合体を光子が通り抜けるにかかる時間は約 3.3×10^{-17} 秒で、レチナール部分だけではその 1/10 程度と計算できます。一秒あたり 1,000 個の光子が一定の間隔で複合体を通過する場合、一つの光子が通過して次の光子が通過するまでの間隔は 1 ミリ秒です。仮に 1 個の光子が複合体を 1 秒かけて通過するとした場合、次の光子が届くまでにかかる時間を計算すると約 100 万年となります。その間、レチナール分子は、5 分かけてシス体からトランス体構造へ変化する計算です。量子の世界は私たちの生物的感觉と随分とかけ離れていますが、分子はそのレベルを捉えているのが分かります。