

温度が光の色を変える

—細胞の中の小さな世界で—

山陽小野田市立山口東京理科大学 薬学部 生命物理化学分野 教授
山陽小野田市立山口東京理科大学 薬学部 生命物理化学分野 助教

ひろい
やまなか
山中
のりこ
りゅう
賀子
龍

光で情報を捉える

今、この原稿を手に行っている人の多くは、自身の目で文字を読んで内容を把握しているのでしょうか。

目を通して光の強弱や、色の種類の情報をとらえ、何を伝えようとしている情報なのかを判断することに慣れていると、あまり疑問に思わないかもしれませんが、目で見えるものの形や色を、自分が即座に理解できるということを。そのため、例えば、何かが赤い光を出しているということが一例えば信号機のランプが赤い光を出しているということが一人の社会において、交通法規上「止まれ」を意味していることを意識することはあっても、「赤い光」そのものが、光の中のどんな光なのか考えたり、特別な条件が整うと、今まで赤かった光が別の色に変わったりする可能性について、じっくり思い巡らせたことのある人は少なそうです。

ところで、他の人が見えるのと同じように色が見え、形が捉えられるということは、思うに特別なことです。私たちの目はそれを実現できるよう、光の情報をうまく集め、かつうまく分解して脳に解析を許す構造をしています。ヒトの目はほぼ球体で、大体直径で2 cm ちょっとあると言われています。ヒトに限らず脊椎動物の場合、似た構造をしています(図1A)。目は光の入ってくる側に角膜、光が映し出される側に網膜を持っています。

光はレンズの役割をする構造を通して、網膜に反転した像の形で焦点を結びます(図1B)。光による情報は網膜で受け取られ、神経活動へと変換されて、脳に情報が運ばれていきます。

光はいくつかの異なる情報を持っています。例えば、光の総量があります。総量としてどれくらいの光が目に入ってくるかを調節する目の機構を虹彩といいます。カメラや顕微鏡の仕組みに詳しい人がいたら、絞りに当たる構造と聞くとピンと来るでしょう。光が入ってくる入り口(=瞳)の大きさを約2~8 mmにまで変えて調節しています。絞りはレンズで焦点を結ぶ仕組みにおいて大事な役割を果たしています。焦点が合わない位置にあるものの像はボケてしましますが、このボケの量が絞りの大きさに依存します。正確には、良好な像が得られる範囲(被写界深度と言います)が、絞りの直径と反比例するので

この虹彩より前に角膜があり、虹彩の後ろに水晶体というタンパク質でできたレンズのような構造があります。水晶体と角膜の間には、水と同じような屈折率を持った液体(=眼房水)が満たされています。目のレンズは、ガラス製のレンズと違って、厚みを変えることができます。厚みを変えることで、いろいろな距離にある観察対象に焦点を変えながら見ることができます。特にヒトの場合は目の大きさは一定で変えることができないの

で、カメラのように焦点位置を変えるためには、レンズと像を結ぶ膜の間の距離を変える代わりにレンズの厚みを変える能力がとても役に立っています。

光が焦点を結ぶ網膜には、光を受容する微細な単位が独立して分布していて、光を受け取ると化学変化を起こします(図1C)。昔風のフィルムに像を焼き付ける仕組みは、網膜に像が作られるのと同様です。デジタルカメラでは、光が当たると電荷を発生する部品が網膜と同じような役割を果たしています。光と電気は実は似たところがあって、原子が持っている電子に、相性の良いエネルギーを持った光を当てると、電子はエネルギーを受け取って浮き足立った状態(励起された状態)になります。ここからまた元の落ち着いた(安定した)状態に戻るのに、今度はエネルギーを別の光として捨てたりします。小さな粒子の世界の出来事として考えると、光は電気や磁気の仲間で、互いによくやり取りをする間柄にあります。

こうした目の仕組みは新しいテクノロジーのヒントになることも多く、最近では液体を膜と膜の間に詰めたレンズに電流を使って厚みを変えることができるようにしたものを使って、携帯電話のような薄型の機器に優れたカメラ性能を加えたりすることに役立っています。

私たちの目には単純化して考えても、水の詰まった球体の一部にレンズやセンサーがあり、光から複合的な情報を集める機能を果たしていますが、もし、水で出来た全く単純な球体であったら、そこに入った光はどんな風にふるまうのでしょうか。

例えば、雨上りの空気中には、たくさんの小さな水滴が浮いています。この水滴は光が作っている波の波長に比べると、1,000倍も大きい直径を持っています。ここに例えば太陽の白い光が入り込むと何が起きると思いま

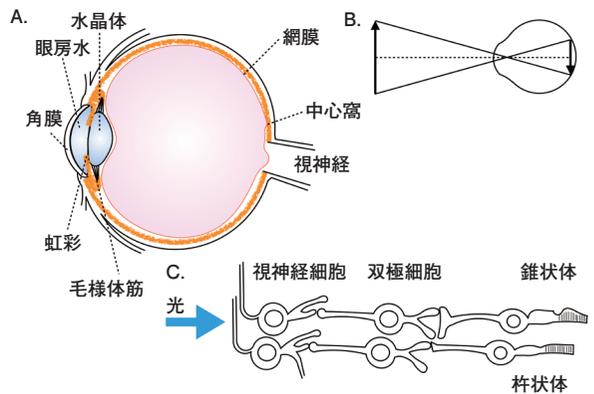


図1 ヒトの目の構造

A. 眼球の断面。右眼の水平断面を上から見たところ。B. 単純化した目で結ばれる像。すべての屈折は角膜の前表面で起こるとすると、交点は角膜の曲率の中心になる。平行光が入射すると網膜上に反転した像が結ばれる。C. 網膜へ続く神経と神経繊維。視神経を経て脳に繋がっている。

すか? 白い光は実は、いろいろな色の光からできています。光をプリズムに通すと、いろいろな色の光に分かれて出て来ます。空中に浮かぶ水滴に入り込んだ太陽の光も、同じようにたくさん色に分かれて出てきます。これは、そう、虹のことです。

光は空気から水に入っていくと屈折します。この屈折の角度が、光の持つ色によって異なります。しかしどのような色の光も水滴の中で一度か二度反射して外に出てきます。例えば、空気から水滴に入るときに屈折して、水滴の内面で一度だけ反射した光は、特定の角度に集まることが知られています。雨上がりの空気中に散らかった水滴で起きた屈折と反射の結果が皆同じ角度に向かって強く集まり、虹になります。虹は、空間の中のどこか決まった座標にあるのではなく、人はたくさんの水滴が出す光を見ているので、自分が移動すれば移動に連れて、違うたくさんの水滴から作られた虹を見ることになります。

光には一つ、二つと数えられる粒子状のものであるかのような性質と、波のような性質とがあります。虹に現れる性質の幾つかは、波の性質として説明できます。波には一回上がって下って元の場所に戻るまでの長さ、

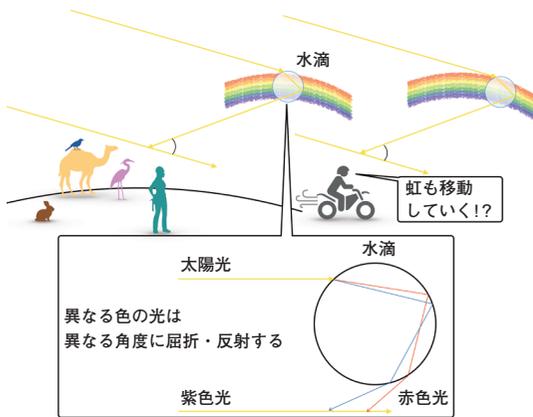


図2 虹ができるときの光の屈折

太陽を背にして一定の方向に虹の輪が見える。球面に光線が入射するとき、ある1点の付近から入った光は皆水滴内で1回反射して、すべて一定の方向に集中して進む。

波長という特徴量があります。波長が違うと、実は違う色の光になります。すなわち、波長の情報とは色の情報にあたります。そして波長が異なると、エネルギーが異なる光となります。波長の短い「青い」光はエネルギーが大きく、波長の長い「赤い」光はエネルギーが小さい光になります。

今、太陽のような白い光がいろいろな色の光から成り立っているというのは、太陽光にはいろいろな波長の光が混ざっており、それぞれ異なるエネルギーを持っている、ということになります。ヒトの目には結ばれた像から多くの複合的な情報を取り出して処理させる能力があるので、目から光を通して私たちは複雑な情報が得られることを当たり前と感じてしまいます。しかし、当たり前に見えるがゆえに、条件によって結果が異なって見えてしまう場合などに気づきにくくなっていることもありそうです。

例えば、条件を変えると、一つの物体が出す光の波長が、元とは異なる値になってしまう、なんて、考えたことはあるでしょうか。実は、光の波長を変えてしまうような影響力を持つ物理量は身近に存在し、その影響はずっと昔からよく調べられています。

その物理量、実は「温度」なのです。

光と温度の関係

光の色に影響を与えることができる要素として、温度が挙げられます。温度が変わると光の色が変わる事象は、人間が鉄を溶かしてさまざまな工業に利用するようになった19世紀に、よく研究されました。工業製品としての鉄の性質は、炭素がどれくらい混ざっているかで変わります。炭素の濃度と鉄が溶ける温度には関係があります。一方、鉄を「ゆっくり冷やした」か「急激に冷やした」かも、鉄の性質を変えます。すなわち、一定の性質の鉄を生産するためには、生産時の温度の制御がとても大事でした。

鉄の色は、パッと見たところ温度が上がるにつれて赤から黄色味を帯びた色へ変化しているように見えるのですが、実際にはいろいろな色の成分を含んでいるので、分光器を使って光を波長ごとに分解し、分けた光の強さを表すスペクトルを一定にすることで、均質な鉄の生産を実現しました。分光器の中には回折格子と呼ばれる部分があります。回折格子にはたくさんの溝（間隔 d ）があります。隣の溝で回折した光と、光が進んだ光路の距離の差（ L ）が、光の波長の整数倍になる方向で光が強め合う、という性質を利用して分光を行います。例えば、図3のように、回折格子に垂直に光が入ってきたとすると、

$$n\lambda = L = d\sin\theta \quad (\text{式1})$$

となったときに光が強め合うこととなります。この式を見ると、波長 λ が変わると回折角 θ が変わる、という関係なので、 θ を測れば波長が分かる、ということになります。鉄を溶かす場合には、温度が高くなると低波長の光が増えていくことが知られています。工業的には鉄の性質を表す測定値が得られ、制御に活かすことができればめでたし、というところですが、人間というのは新しく何かを知ると、その背景の仕組みまで知りたくなるものです。

一定の性質の鉄を生産するために分光器を活用することを考えついたドイツの鉄鋼産業は、19世紀後半から20世紀初頭に鉄の生産量を伸ばしますが、一方で、「特定の波長の光だけが分光すると検出されるのはなぜか？」という科学的問題について、真剣に考える人たちが現れました。この人たちは、先ほど出てきたような、小さな粒子の世界の出来事として光の性質を考えると、光が飛び飛びのエネルギーを持っていることがうまく説明できると気がつきました。光が移動する速度はすべて秒速30万kmなので、波長が短ければ1秒間に30万km進む間の波の数が多くなります。

1秒間に光が進む間に含まれる波の数を振動数と呼び、ヘルツHzという単位で表します。

さて、光はそれぞれが持つ振動数に比例する大きさのエネルギーを持っています。光がエネルギーを持っているという体験は、日の当たる場所にいると体が温まる、などの現象で身近に感じることができます。

ところで、振動数に光のエネルギーが比例すると考えると、振動数が大きい光、すなわち波長が短い光が大きなエネルギーを持っていることが分かります。さらに詳しく調べていくと、光のエネルギーは、振動数にある大きさの定数をかけた値の整数倍の値をとることが分かりました。つまり、光はどんな大きさのエネルギーでも持つことができるのではなく、飛び飛びの、特定の値のエネルギーを持つということになります。この性質を簡単な式に書くと次のように表すことができます。

$$E = nhv \quad (\text{式2})$$

ここで、 E はエネルギー、 n は正の整数、 h は発見者にちなんでプランク定数と名付けられた定数、 v は振動数です。

式2の意味するところは、ある大きさのエネルギーを持つ光に、変化を起こすような操作を加えた場合でも、変化して出てくる光のエネルギーの大きさは、飛び飛びの値の大き

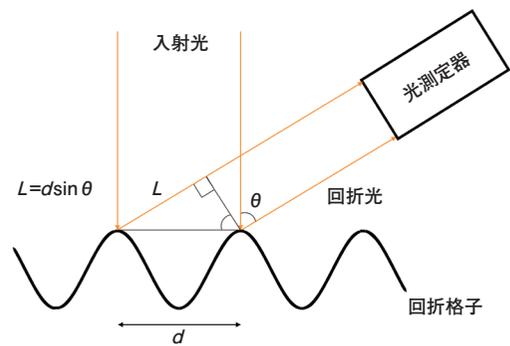


図3 分光器を使った光のスペクトル計測の原理

さを持つ、ということです。この、飛び飛びの値のエネルギーをとる、という光の性質が、例えば、原子に相性の良い大きさのエネルギーを持つ光を与えた場合にのみ、一度励起された電子から、新しい光(蛍光)が放出される現象を引き起こすことができる仕組みに結びついています。

しばらく、この光のエネルギーの塊(光子)や電子といった、とても小さな粒子とそれらが大きな影響力を持つような、小さな世界での出来事について考えてみましょう。

量子ドット

今、原子が $10 \sim 10^5$ 個くらいの数で出来ている、とても小さな球状の物体があったとします。この物体に捕われて球状に分布している電子は、その球の半径 R の二乗に反比例するような大きさのエネルギーを持つことが知られています。この条件も簡単な式に書いてみましょう。

$$E = \frac{h^2 n^2}{CR^2} \quad (\text{式3})$$

C の中身は定数だとして、プランク定数 h や整数 n なんかで表せる値のエネルギーを球体内の電子は持っています。この場合、 R が小さければ小さいほど、エネルギーの値は大きくなることが分かります。例えば、カドミウム(Cd)という金属と、セレン(Se)という金属で作った小さな半導体の玉について考えてみましょう。半導体には、価電子帯と呼

ばれる電子が蓄積するエネルギーの低い領域と、伝導体と呼ばれるエネルギーの高い領域、その間にできる禁制帯があります。半導体を作るような材料がちょうど $10^4\sim 10^5$ 個くらいの原子が集まって出来ているような結晶を、量子ドットと呼びます。球状の量子ドットの中の電子があちこち動き回りやすくなるためのエネルギーを与える方法として、光を当てる、という方法や、温度を上げることで、電子の動き回りやすさが向上します。それぞれ光励起（光を照射してエネルギーの高い状態にしてやること）や昇温（温度を上げること）によって電子の移動度が上がり、電気伝導率が増加する、と言います。

電子のエネルギーが式3のように書ける場合、このエネルギーを光を放出することに使うとしたら、どんな性質が現れるでしょうか。

球の半径にエネルギーが依存するので、量子ドットが小さければエネルギーの高い青い光を、大きければエネルギーの低い赤い光を出すことが予想されます。この性質は実際の観察でよく確認されています。

一方、エネルギーと温度の間にも関係があります。エネルギーと温度の関係は、半導体の場合次のように書くことができます。

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{式4})$$

新しい記号として、 T は絶対温度、 α 、 β はそれぞれ定数です。また E_g 、 E_0 は、価電帯と伝導帯の間のエネルギーギャップ、温度が0Kのときのエネルギーを表しています。量子ドットを温めてやると、温度が上がるにつれて、エネルギーが低いところ（価電子帯）からエネルギーが高いところ（伝導帯）へ遷移を起こすのに必要なエネルギー（ E_g ）が小さくなることが分かります。遷移するのに受け取ったエネルギーが小さいと、元の低いエネルギーに戻るために放出するエネルギーも小さくなるので、仮に光の形でエネルギ

ーを放出して元の低いエネルギー状態に戻るのだとすると、温度がより高い方がより小さなエネルギーを持つ光、すなわち、より赤い光を放出することになります。つまり、量子ドットを温めてやると、冷やしてやったときに比べて、観察できる光が赤っぽくなる、ということです。このときの温度とエネルギーの関係ははっきりしているので、観測した光の波長からエネルギーを求め、放出されたエネルギーから温度を逆算することができます。

量子ドットというのは先ほど紹介したように、 $10^4\sim 10^5$ 個の原子から作られているような小さなものなので、例えば、細胞のようなものと比べるとずっと小さいと言えます。

もっと具体的に比べてみると、CdやSeの原子半径は1.20~1.51 Åですから、単純にCd:Se = 1 : 1で、10個寄せ集まったとすると、大雑把に8 Å前後のような大きさ、その 10^4 倍の原子が球をなすように集まった場合の直径は40~50 nmくらいの大きさになることが見込まれます。本当に大雑把な桁数感覚でいうと、1~50 nmくらいの大きさの粒子、というイメージです。細胞の方はというと、細胞自体の大きさが10~100 μmくらいのもが多く、細胞小器官の大きさや、バクテリアのサイズが1 μmくらいの大きさになります。量子ドットは細胞に対しては、大きくても1/200、小器官に対してでも1/20なので、例えば小器官の中のほんの一部、というような小さな範囲にとどまることができます。

もう一つ、皆さんに知っておいて欲しいことがあります。この電子や光子の間で起きるエネルギーのやり取りにかかる時間がどれくらいか、ということです。一度励起された電子からエネルギーが放出されて、低いエネルギー状態に戻るまでにかかる時間を一正確にはちょっと違いますが一蛍光寿命と言って、大体0.5~5 nsくらいの時間になります。

では、熱の方はどうでしょう。細胞くらい

の大きさのものの中の、一点を1 K温度上昇させた場合に、この温度変化が拡散して均一になるまでにかかる時間は0.2~1 msくらいだと計算されています。これは、電子や光子がエネルギーのやり取りをするのにかかる時間に対して、桁で考えて大体100万倍 (10^6 倍) くらいの長さの時間がかかっていることになります。もし、私たちが細胞の一部で起きる、1 Kくらいの温度変化を捉えたいと思うなら、細胞の一部より大きさに小さいもので、細胞内で起きる温度変化より短い時間で変化が終わるものを使う必要があります。

細胞の中の温度を測る

さて、ここまでいろいろ確認してきたことを元に、細胞の中の、小さな領域の温度変化を測る方法を考えましょう。量子ドットのような道具を使うと、温められたときに受け取ったエネルギーが一定の大きさになったところで、量子ドットの中の電子が高エネルギー状態に変化し、そこから低エネルギー状態に戻る際に、光を發します。この光は、温度が低ければ青に寄った色の光に、温度が高ければ赤に寄った色の光になるので、出てきた光の波長(色)を計測し、そこから逆算すると、量子ドットが何度になっていたのかが分かります。

量子ドットは非常に小さいので、量子ドット全体が均一な温度になるまでにかかる時間は、これまでに出てきた数値を利用して考えると、0.1~1.0 nsの桁数の時間の長さと考えられます。これはエネルギーを受け取った電子が光を發する時間の長さと同じ桁の長さの時間にあたります。仮にCdとSe合わせて10個の原子で出来ている量子ドットだとすると、大雑把に400個程度の電子を量子ドット内に持っていることになります。量子ドットがいる細胞の温度が、一過的に上昇した場合、上昇した温度が持続する時間の長さが、

量子ドット1個が温まる時間の 10^6 倍持続するという条件下では、量子ドットが昇温によって受け取ったエネルギーで電子が励起し、確率的に光を發して低エネルギー状態へと、すべての電子が落ち着いていくまでの間、ずっと同じ温度条件を反映した光を發することになります。

最近、細胞の中のような小さな環境での温度変化を、光を使って測定する研究が流行っています。さまざまな原理を利用した方法で測定が行われ、皆同じような温度差を検出するので、きっとこれらの測定結果は正しいに違いない、と研究者たちは思いながらも、いくつか疑問が残されていることにも気がついています。

それは例えば、細胞の中でいかに温度の違いが長時間保たれているのか、といったことです。細胞は自分で熱を作り続けられるので、絶え間なく温められ続ける結果、温度の高い場所ができるとしても不思議ではありません。一方で、一過性にしか熱が作られない場合、その熱は細胞にとってはとても短い時間—細胞の一生(1回細胞が分裂して増えるまで)の 10^6 ~ 10^8 分の1で細胞内を熱が拡散することになります—この細胞にとって意味のあるイベントを見るような時間の長さで観察したときに見られている光の性質の変化は、光を發する物質が、温度差から生じるエネルギーを受け取って光という形で捨てる、というイベントを、間違いなく観察した結果なのでしょうか?それとも別の現象を見ているのでしょうか。また熱が細胞内で作り出され続ける場合、細胞全体が温まってしまったりはせず、一部でその熱が維持され、他の場所では逃げていくのはなぜかなど、今は明らかでないことだらけです。

この謎を解いていくには、きっとその謎の実態より目盛りの細かい定規が、役に立つに違いありません。皆さんはどう思われますか?