

## 光の作られ方

－波動現象にとどまらない小中学校理科指導の視点－

### Production of light

－A viewpoint on science education of elementary and junior high school  
without keeping knowledge in wave phenomena－

畑口紗絵香, 神田竜也, 杉村健史, 古屋康則, 吉松三博, 仲澤和馬\*)

Saeka Hataguchi, Tatsuya Kanda, Takeshi Sugimura, Yasunori Koya,  
Mitsuhiro Yoshimatsu and Kazuma Nakazawa\*)

岐阜大学教育学部, 理科教育講座 〒501-1193 岐阜柳戸1-1

#### 要 旨

光は日常生活の中でとても身近な存在である。反射, 屈折, 全反射などの性質については学習するが, 光がどのようにして作られているのかを理解している学生は多くないのではないだろうか。連続的な波長をもつ光と, ある決まった波長をもつ光とに分けて, 光の作られ方を解説した。その上で, 身の回りにおける光の作られ方を解説した。

#### 1. はじめに

光は小学3年生の「光の性質」の単元で扱われ, その直進性や集光および反射を通してその性質を理解するとともに, 日光の照射によるものの明るさや暖かさが変わることからエネルギーについての基本的な見方を養うことが要求される<sup>[1]</sup>。中学1年生では『光と音』の単元で, 反射, 屈折(回折), 全反射を扱い, 凸レンズを用いて実像と虚像について学習する<sup>[2]</sup>。以上を土台に高等学校では, 「物理基礎」には光の取り扱いはないが, 「物理」における「波」の項の「光」の単元で, 光の伝播について理解を促すと同時に, 反射, 屈折, 回折, 干渉, 分散および偏光などが扱われる<sup>[3]</sup>。ここまで見てきてわかることは, わが国の初等・中等教育における光に関する教育は, その性質に重点がおかれていることである。しかし, 作られた「結果」としての光の性質を理解させても, 「光は電界と磁界を対とする『波』である」(後述)などということが理解できるだろうか。現実には, 「光が『波』であるならば, その波を伝える媒質は何ですか?」との問いに, 「電子」などと応える大学生が少なくない。このような状況から, きちんと「光の作られ方」という観点でまとまった解説を行う必要性を感じる。

光の作られ方を理解するには, まず小学校5年次での電流が磁界を作ること, および6年次の「手回し発電機で電気がつくられる」原理<sup>[4]</sup>などの知識が基礎である。その上に中学校2年次の「電流と磁界」で扱われる電磁誘導<sup>[5]</sup>の理解を持ち込むと, 白熱電球などの連続的な波長をもつ光(以下, **連続スペクトル**と呼ぶ)の生成は理解できる。一方, レーザーポインターなどの決まった(特殊な)波長しか持たない光(以下, **線スペクトル**と呼ぶ)の生成の理解には, 平成10~11年の指導要領改訂にともない「選択」となった高等学校「物理Ⅱ」に所収の原子スペクトルに関する知識が必要である(なお原子スペクトルについては平成21年の指導要領「理数編」では「物理」において必須となった)。しかし, たとえ物理を学習しなくても, 「化学基礎」で扱うことになっている原子構造の簡単なモデルが理解されていれば, 線スペクトルとしての光の生成を理解することは難しくない。

このようにして本稿では, 光の作られ方は大きく分けて2種類あり, それは連続スペクトルと線スペクトルであることを前提に解説するものである。このことは, 伝える媒質のない光に関する生徒の理解を促すことになるであろう。

\*) TEL:058-293-2246 (e-mail:nakazawa@gifu-u.ac.jp)

## 2. 電磁波（光）の作られ方

### 2-1. 電磁波（光）の正体

ジェームズ・マクスウェル（英）（1831～1879）の理論によると、電界は電流の磁気作用により磁界を形成し、その磁界により電界を形成し、さらに電界が磁界を形成し…というように2つの場合は次第に広がっていく。これは1本の鎖のような形をしており、電界と磁界が交互につながり合い、1つの波のように空間を伝わっていく。この波を電磁波という。このようすを図1に示す<sup>[6]</sup>。

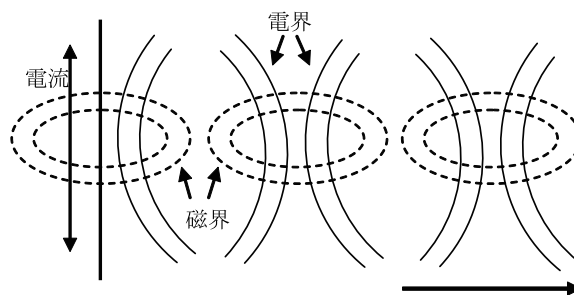


図1. 磁界と電界の連鎖としての電磁波

以上から電界と磁界が常に直交することがわかる。図1をより模式的に表すと、いろいろな教科書に掲載されている図2のようになる。繰り返しの最小単位が波長（ $\lambda$ ：ラムダ [m]）であり、電磁波の速さ（ $c$  [m/s]）と周波数（ $\nu$ ：ニュー [1/s]，振動数ともいう）との間には、

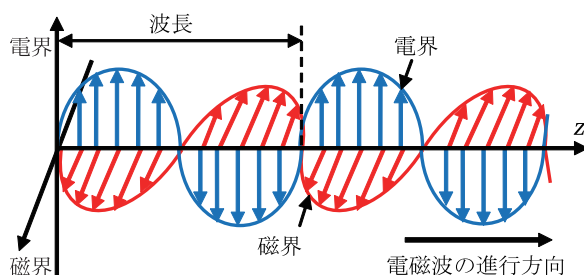


図2. z軸上を進む電磁波

$$c = \lambda\nu \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

なる関係がある。

さて図2では、z軸上に光を伝播させる何か媒質のようなものの存在を思い浮かべてしまう学生が少なくない。その点では、図1に示す「媒質のない」描像の方が優れているように感じられる。

### 2-2. 連続的な波長をもつ光（連続スペクトル）

前節で述べたように、電界と磁界が交互に形成されていくのが電磁波（光）の正体であるとする、磁界が電界を形成するには、磁界の大きさが変動することが重要である。このことは、小学校6年次のモーターの軸を手で回す「手回し発電機」が発電できる原理でもある。磁界の大きさが変動するには、おおもととなる電流の大きさが変動すること、すなわち交流電流のみが電磁波を作り出せる、と考えてしまわないだろうか。しかし懐中電灯は、乾電池から供給される直流電流によって、立派に光を放つではないか。

ここで、「金属が電気を通すわけ」を思い起こしていただきたい。詳しくは参考文献<sup>[7]</sup>に譲るが、金属内には自由に移動できる「自由電子」が存在する。この自由電子の動き（＝電流）で電磁波を作ろうとすると交流でなければならない。一方、自由電子として最外殻の電子を吐き出した原子はイオン化している。このイオンは、ある位置を中心に振動しているので、微視的には交流電流が生じていることになり、電磁波（光）が作られる。繰り返しになるが、巨視的に直流電流が流れていても、イオンと化した電荷をもつ原子の振動が交流電流のもととなり光が作られる。

金属線に直流電流を流すと熱くなる。例えば、鉄を用意しよう。これに直流電流を流していくと、やがて赤みを帯びた光を発し、さらに電流を流すと橙から白みを帯びた光を発する。加熱した鉄の温度は1000℃を超えているであろうが、この熱エネルギーはイオン化した原子の振動そのものである<sup>[8]</sup>。もし1 mol (56 g) の鉄であれば、アボガドロ数 ( $6.02 \times 10^{23}$ ) 個のイオン化した原子が振動していることになる。しかし、これだけの原子すべてが、全く同じ振幅および振動数で振動しているわけではない。平均的には例えば1000℃に相当するような振動をしてはいるが、イオン化した原子の振動の振幅と振動数は同一ではなくバラバラである。ここで振動の振幅は電界の強さ（すなわち光の

“明るさ”）に対応し、振動数は波長（すなわち“色”）に対応する。したがって、一様でないバラバラなイオン化した原子の振動からつくられる電磁波（光）は、連続的な波長をもつことになる。このようにして、連続的な波長をもつ連続スペクトルの電磁波（光）が作られる。

一方、ラジオやテレビの電(磁)波は、自由電子の動きを制御して交流の電界を発生させるので、ある決まった周波数（すなわち波長）となる。

### 2-3. ある決まった波長をもつ電磁波・光（線スペクトル）

前節の最後に、ラジオやテレビの電(磁)波を紹介したが、周波数の決まった交流の電界を作ると、2-1節で述べた原理で、周波数の決まった電磁波を作ることができる。そのもっとも身近な例が、私たちの生活の周りにある100ボルトの電線である。いろいろな電気機器をつなぐコンセントにたどり着くコードから西日本では60Hzの電磁波が発生している。この電磁波はオシロスコープで観察できる。図3は、部屋内の空間に漂う電磁波を、接地していないプローブを使ってオシロスコープでとらえたものである。

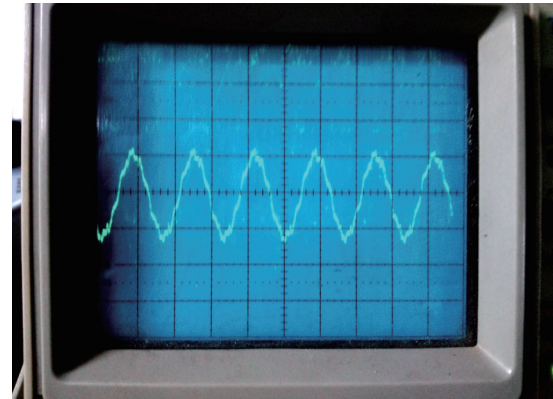


図3. 部屋内に漂う60 Hzの電磁波。  
(縦軸：1 V/cm, 横軸：10 msec/cm)

さて私たちの目で確認できる光（可視光線）は、どれくらいの周波数であろうか。様々な波長の電磁波は、図4のように分類される。

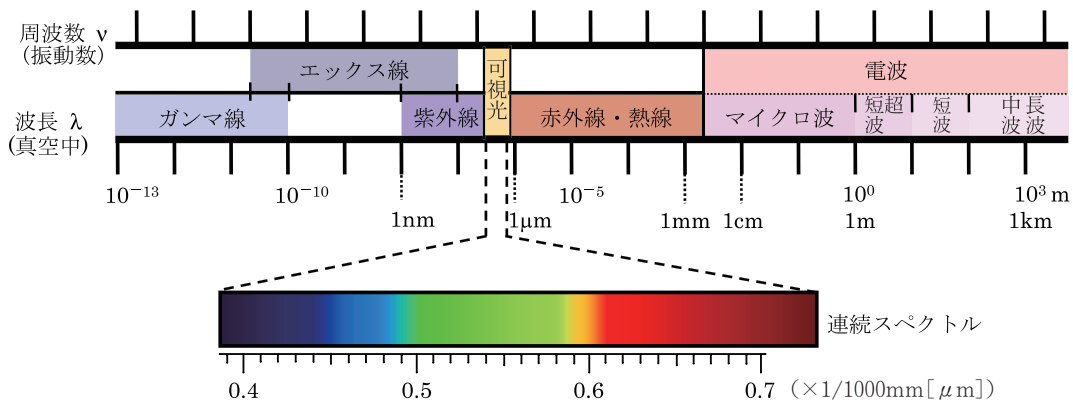
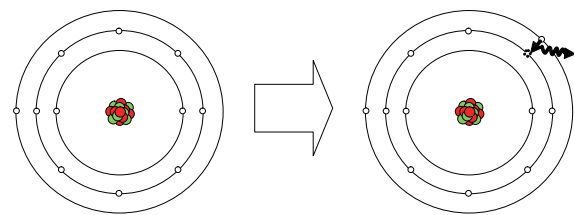


図4. 電磁波の分類（スペクトルは著者の作図である）

その中で可視光線の波長は、おおよそ $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ （マイクロメートル； $1 \mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm} = 10^{-6}\text{m}$ ）である。例えば $0.5 \mu\text{m}$ の波長の緑色の光の周波数は、光の速さが $3 \times 10^8 \text{m/s}$ なので、前節①式より $6 \times 10^{14} \text{Hz}$ となる。ラジオのFM放送でも高々100MHz（ $=10^8 \text{Hz}$ ）であることを考えると、可視光線は100万倍も大きな周波数である。このような周波数を持つ電磁波を交流の電界で作ろうとすると、「アンテナ」が溶けてしまう。したがって、原子の「力」を借りるしかない。



ボーアの原子モデルに基づく、原子を覆う電子（軌道電子という）は、図5に示すようにある

図5. ボーアの原子モデル。左が基底状態、右が励起状態から基底状態に戻るときに、光を発することを示している。

決まった位置に存在する。図はナトリウムを例にしている。通常原子は、内側の軌道から順に電子が配置され、エネルギー的に最も低い安定な状態（基底状態という）にある。これに外部からの作用（例えば放電させて電子を衝突させるなど）を受けると、電子が外側の軌道に移り、エネルギー的に高い励起状態となる。しかし、電子は励起状態を長くは維持せず、エネルギー的に低いより安定な状態である内側の軌道に戻ることになる。この、電子が励起状態から基底状態に戻る際に、前後のエネルギー差  $\Delta E$  に対応する電磁波（光）が放出される。放出される電磁波の周波数  $\nu$  は、

$$\nu = \Delta E/h \dots\dots\dots ②$$

である。ここで  $h$  は、プランク定数（ $6.6 \times 10^{-34}$  J・s）である。

原子の周りを覆う軌道電子の位置するエネルギーは、原子ごとに決まっているので、エネルギー差も軌道間ごとに決まっている。したがってある決まったエネルギー（すなわち波長）の電磁波が放出される（作られる）。これを線スペクトルという。

ナトリウムからは、波長の接近した黄色に近い橙色の2つの光（ $\lambda_1 = 589.593\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 588.997\text{nm}$ , ここで  $1\text{nm} = 1/1000 \mu\text{m}$ ）が作られ、これをナトリウムのD線と呼んでいる<sup>[9,10]</sup>。水素原子からは4色（波長は  $656.285 \text{ nm}$  [H $\alpha$ ],  $486.133 \text{ nm}$  [H $\beta$ ],  $434.047 \text{ nm}$  [H $\gamma$ ],  $410.174 \text{ nm}$  [H $\delta$ ])<sup>[9]</sup>の光が作られるが、プリズムなどで分光せずに見てみると、4色が混ざった青白い光となって目に入ってくる。

### 3. 身近な光の生成

#### 3-1. 波長が連続的に分布する光（連続スペクトル）

##### (1) 白熱電球

白熱電球の場合は、中心のフィラメントに電流を流すとフィラメントが高温になる。すなわちフィラメントを構成する金属（一般的にはタングステン）原子がイオン化し、このイオンの振動により電磁波が発生する。図6-1は、著者宅の白熱電球である。点灯中のフィラメントの温度は2000~3000℃程度に達し、前記2-2に述べたように連続的な波長の電磁波を発生し、図6-2に示す色の混ざった光を放つ。



図6-1. 白熱電球



図6-2. 白熱電球のスペクトル（作図）

##### (2) 虹

虹は太陽からの白色光が、空気中に存在する水滴に出入りする際の屈折により起こる現象である。図7-1に虹を示す<sup>[11]</sup>。波長が短い光は長い光より大きく屈折する。太陽光をプリズムに通すと、図6-2のように色が分かれるのもそのためである。



図7-1. 虹

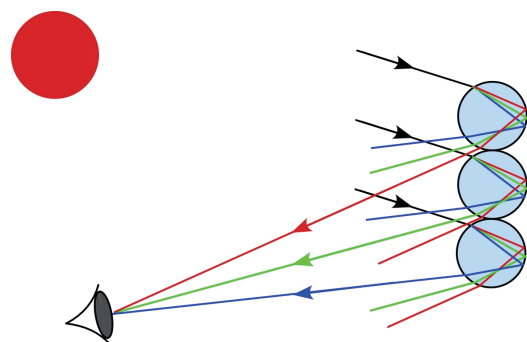


図7-2. 虹の見え方

太陽光が水滴に入るときに、波長の短い光は大きく屈折して水滴に入射し、目に入るのは大気の下から来るものである。一方、大気の上から来る波長の長い成分が目に入るのので、虹は下側から紫⇒青⇒・・・⇒赤、と色が変化する。このようすを図7-2に示す。この虹は、はっきり見えるので主虹と呼ばれる。これより外側には、色の順が入れ替わった副虹が見えることがある(図7-1参照)。

### (3) 太陽光

物質は3つの状態、すなわち固体、液体、気体の状態をとるとされている。しかし太陽はそのどれにも当てはまらない、プラズマ状態である。プラズマ状態とは、イオン化した原子が高密度でかつ高エネルギーで運動している状態であり、図8-1のように高温のスープでもあるかのようである<sup>[12]</sup>。これはまさに、白熱電球のフィラメントを構成するイオン化した原子が発光するのと同様で、連続スペクトルの光を放出する。

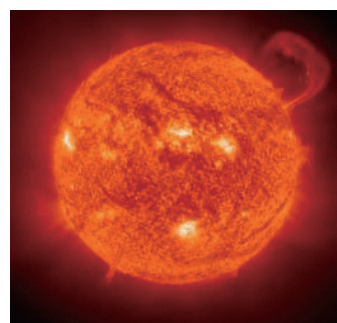


図8-1. 太陽とプロミネンス<sup>[12]</sup>

太陽からの光をプリズムなどを通して詳しく調べると、図8-2にみられるように、所々で光が届かないところがある。これは吸収スペクトルと呼ばれるものであるが、詳しくは次節に譲る。



図8-2. 太陽光の吸収スペクトル(作図)

## 3-2. ある決まった波長をもつ光(線スペクトル)

### (1) いろいろな原子からの線スペクトル

前2-3節で述べたように、原子が励起状態から基底状態に戻る際に、電磁波が放出される。図9に、水素とナトリウムの可視部の線スペクトルを示す。これらだけでなく、多くの原子から特徴的な可視光が放出され、その波長分布は原子ごとに異なり、あたかも原子の指紋のようである。



水素



ナトリウム

図9. 水素とナトリウムの線スペクトル(作図)

### (2) 太陽の吸収スペクトル

太陽からは連続的な波長の光が放出されているが、図8-2の太陽光のスペクトルを見てわかるように、ところどころに黒い線(暗線)を確認することができる。これは、太陽の周りに存在するある原子が、その波長の光を吸収したことによって起こっている。光を吸収して励起状態となったうえで、基底状態に戻るときに四方八方に光を放出するので、地球に届く光量が減少することによって起こる。図8-2を見ると、図9で示した水素とナトリウムの線スペクトルのところの光が、地球に届いていないことがわかる。このことから太陽の周り(あるいは太陽と地球との間)には、少なくとも水素とナトリウムが存在することがわかる。

### (3) ナトリウムランプ

ナトリウムランプは真空管中にナトリウムの気体を充満させ、その中で放電させることで、図9にみられるナトリウム特有のオレンジ色に近い黄色の光を発生する。その波長は、2-3節



図10. ナトリウムランプ

で述べた約590nmである。図10は、道路に設置されたナトリウムランプである。

#### (4) 広告用ネオン灯など

ネオン灯もナトリウムランプと同様に真空管の中にネオンガスを充満させ、放電させて光を発生させる。その充満させるガスの種類によって、ネオンなら赤橙色、アルゴンなら赤紫色、アルゴン+水銀なら青色、炭酸ガスなら白色というように、発光色が変わる。図11を見ると、アルファベットの文字部が管状の発光体であることがわかる。



図11. 広告用ネオン灯など

#### (5) 蛍光灯

蛍光灯では、水銀のガスを充満させたガラス管内を放電させ、水銀から放出される紫外線を放出させる。この紫外線を吸収したガラス管内壁に塗布した蛍光塗料が励起し、基底状態に落ちるときに可視光を放出するものである。図12-1は著者宅の蛍光灯で、一般的に図12-2にみられるように3つの波長の明るい光が混ざって、白色に近い蛍光として認識される。

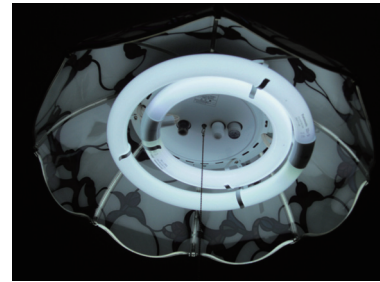


図12-1. 蛍光灯



図12-2. 蛍光灯のスペクトル (作図)

#### (6) LEDなど

低電力発光体としてLED（発光ダイオード：Light Emitting Diode）がいろいろなところで利用され始めている。この発光機構も原子が大きく関与しているが、このような半導体に電気が流れる理由をはじめとする発光機構については、別に述べることとする<sup>[13]</sup>。

## 4. まとめ

電磁波（光）は、電界の変動により誘発された磁界が、変動する電界を誘導し、その電界が磁界を発生することの繰り返しによって発生する。おおもとの電界の変動は、電流の変動のみならず、導線を構成するイオン化した原子の変動であり、また太陽光のようにプラズマ状態を形成するイオンの変動からもたらされ、連続的な波長をもつ連続スペクトルの電磁波（光）が作られる。その作られ方の例として、白熱電球、虹、太陽光を例にとって説明した。一方、原子の励起が関与すると、基底状態とのエネルギー差に対応する、ある決まった波長をもつ線スペクトルの電磁波（光）が作られることがわかった。これについては、ナトリウム灯、広告用のネオン灯、蛍光灯などの身近な照明を例にとり解説した。

## 参考文献

- [1]「小学校学習指導要領解説（理科編）」、平成20年8月、p.24.
- [2]「中学校学習指導要領解説（理科編）」、平成20年9月、pp.23-25.
- [3]「高等学校学習指導要領解説（理数編）」、平成21年12月、p.42.
- [4]「小学校学習指導要領解説（理科編）」、平成20年8月、pp.47-48および59-60.
- [5]「中学校学習指導要領解説（理科編）」、平成20年9月、pp.37-38.
- [6]「物理学讀本」 朝永振一郎 編、みすず書房、昭和28年5月30日 第4刷、p.133.

- [7] 「金属が電気を通すわけ — 小中学校理科指導の視点 —」, 福永明日香, 他, 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学) 第35巻, (2011) pp.17-25.
- [8] 「熱さ・冷たさを感じるわけ — 小中学校理科指導の視点 —」, 福永明日香, 他, 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学) 第35巻, (2011) pp.27-31.
- [9] 「基礎物理学実験 増訂版」下村健次 他 共編, 共立出版, (2010) 付録p.8.
- [10] “[http://www.shiga-ec.ed.jp/kagaku/05shisets/bake/kiki\\_phys\\_13.pdf](http://www.shiga-ec.ed.jp/kagaku/05shisets/bake/kiki_phys_13.pdf)” によると, 中原勝儼著「色の科学」(倍風館1985)の引用として, 次のような記述がある。「ナトリウム原子は11個の電子をもち, 基底状態は,  $n=1, 2$  の内部閉殻と  $n=3$  の s 状態に 1 個の電子がある。この基底状態の次に高いエネルギーの状態は,  $3s$  状態の電子が  $3p$  状態に励起されたもので, ごく接近した二つのエネルギー準位 ( $3^2P_{1/2}$  と  $3^2P_{3/2}$ ) がある[5]。ナトリウム原子の橙色の二つの線スペクトル  $D_1$  と  $D_2$  は, これらの励起状態から基底状態の遷移に伴う発光によるものである。」
- [11] 2011年9月24日, 北海道上川郡東川町にて撮影。
- [12] NASAを出典として “[http://www.astronomy.orino.net/site/kataru/solar\\_system/sun.html](http://www.astronomy.orino.net/site/kataru/solar_system/sun.html)” にて紹介されている。
- [13] 「半導体が電気を通すしくみ — 金属と対比した小中学校理科指導の視点 —」, 神田竜也, 杉村健史, 畑口紗絵香, 古屋康則, 吉松三博, 仲澤和馬, 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学) 投稿予定。

