

2 光, 電磁波

光は, ある波長範囲の電磁波である.

電磁気学が発展する中で

- ・ 電荷と電場について逆二乗則
- ・ 磁場についての逆二乗則
- ・ 電流がつくる磁場について, アンペールの法則
- ・ 時間変動する磁場と電場について, 電磁誘導の法則

が見いだされた. しかしアンペールの法則が電荷保存則を満たしていないので

マクスウェルが「時間変動する電場があたかも電流のように磁場をともなう」と仮定した.

この仮定を含めた「マクスウェル方程式」から数学的に「電場と磁場の波動」が予測される.

実際に電磁波の存在を確かめたのはヘルツであった.

予測され, 観測された電磁波の位相速度は, 既知の可視光の速さと一致したので

光が電磁波であろうと推察された.

真空を伝わる熱放射も, 干渉を起こすので, 電磁波であることが推定された.

物体を通過し金属などで遮られるX線も, 静電場や静磁場に影響されないので, 電磁波と推定された.

電磁波(光)は, 電場と磁場の横波である.

3 偏光 1

電磁波の電場ベクトルが一定の方向で振動するとき、直線偏光という。

磁場も（電場と直交するので）、一定の方向で振動する。

電場ベクトルの向きが地上の実験室の机面と平行（直交）のとき、水平（垂直）偏光ということがある。

ある位置で、同時に2つの電場ベクトルがあると、それらのベクトル和が実際に観測される電場となる： $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$

直線偏光の \mathbf{E}_1 と \mathbf{E}_2 が同じ位相で振動するとき、ベクトル和 \mathbf{E} も直線偏光となる。

直線偏光の \mathbf{E}_1 と \mathbf{E}_2 が互いに位相差 $\delta = 90$ 度で振動するとき、ベクトル和 \mathbf{E} は時間的に回転する。

$$E_x = E_{x0} \sin(kz - \omega t)$$

$$E_y = E_{y0} \sin(kz - \omega t + \delta)$$

円偏光は、位相差の符号により、「右」「左」の二つがある。

左右の円偏光を合成すると直線偏光を得る

4. 光の放出と吸収

1. 荷電粒子が加速度運動すると光が出る.
2. 光電場を吸収すると荷電粒子が加速度を得る.

黒体放射： 熱運動（さまざまな振動数のランダムな単振動の集まり～

蛍光： 荷電粒子（原子や分子内の電子）が蓄えたエネルギーを後に光として放出

散乱光： 荷電粒子が光により強制振動し、どうじに光放出する

レーザー光： 誘導放出，光の増幅

5. 可視光の色

プリズムで可視スペクトルを見る

屈折が起きると白色光は様々な色のスペクトルに分解される。

上図は白色光のビームがプリズムで分かれる様子を示す。

プリズムに入ったときと出るときに光が色ごとに分かれる。

白色光が様々な色に分解される現象を分散(dispersion)という。

光が様々な色に分解されるのは、ガラス中で光の速さが波長ごと、したがって色ごとに異なるからである。

ガラスの屈折率は紫・青で大きく赤で小さいというように色で異なる。

プリズムは赤い光より青い光を大きく曲げる（青が一番大きく曲がる！）ので、プリズムで分解されたスペクトルの赤の部分は常にもっとも屈折しないところに出てくる。

3原色と2次色

赤、緑、青が光の3原色である。

下図はこれらの色が白いスクリーン上で重なったときの様子を示す。

3つの原色が全部重なると白く見える。

2つの原色が重なると2次色が見える。

たとえば黄色は、赤と緑の重なりによる2次色である。

2次色のひとつと、そこに含まれない原色をひとつ重ねると白く見える。

この2次色と原色を互いに補色という。

たとえば黄色は青と重ねると白くなるので、黄色の補色は青である。

6 連続スペクトルと輝線スペクトル

連続スペクトル

白色スペクトルは、深紅から紫をカバーするスペクトルの全域で色が連続的に変化し、対応する波長領域をくまなく覆っているため、連続スペクトルの例である。

太陽や星々、白熱電球は、いずれも波長が連続的に広がっている光を放出するので、連続スペクトルの光源である。

上図は、放出される光の波長ごとのエネルギー分布が光源の温度によって異なる様子を示す。

豆電球に流す電流を、0から徐々に通常の明るさで光まで上げるとき、発光が変化する様子を観察せよ。

電流によりフィラメントが十分に加熱されると光り始めるが、最初は暗い赤色、そして赤橙色、さらに黄色に変わる。

これは、温度が高いほど短波長側の光を強く放出するからである。

炭素アークランプ（放電で高温になった炭素棒が発光）が白色に見えるのは、温度が非常に高く青色光もスペクトル中の他の色と同じように放出されるからである。

さらに高温だとスペクトル中の青がより強くなって青白く見える。

これらの観測結果は星の温度の比較に利用できる。

たとえば、赤い星より青い星のほうが高温である。

太陽は黄色く見える星なので、赤い星より表面温度が高い。

輝線スペクトル

希ガスの放電管（例：ネオン管）や金属蒸気の放電管（例：街路灯のナトリウム・ランプ）から出る光のスペクトルは線で構成され、それぞれの線が異なる色を持つ。

下図を見よ。これは光源が決まった波長の光だけを放出するからである。

このような光源からの光を細い帯状のビームにしてプリズムで分けると、スペクトル中にそれぞれの色の線が分離して見える。

光源が異なると輝線スペクトルの線の並び方のパターンが異なる。

以下で説明するように、それぞれの輝線の波長は回折格子(diffraction grating, かいせつこうし)で測定できる。

光源が単一の元素ならば(たとえば、ネオン管のネオン)、輝線スペクトルはその元素の特徴を持つので、スペクトルから逆に元素を特定できる。

天文学者はこのやり方で星の元素を特定する。

7 回折格子

回折格子を使うと光の波長を測定できる。

この装置では接近したスリットが等間隔で平行にたくさん並んでいる。

ここでは透過型の回折格子を説明するが、金属などの表面にスリットの役割をする細線を刻む反射型が昔から使われてきた。

図1に示すように、平行な単色光が回折格子に直角にあたるとき、多数のスリットによる回折の効果として特定の方向にだけ光が進む。

回折格子の作用は光波の回折にもとづく。

光が多数のスリットを通過すると回折による波が重なり合って特定の方向だけ強め合う。

回折光は中央から番号をつける（回折の次数）。

図2に回折波面の形成を示した。

1次の波面は、あるスリットから来る光が1波長分だけ余分に進んだあと隣のスリットから来る光と同位相になるときに作られる。

図3で示すように、この余分の距離は $d \sin \theta_1$ に等しい。

ここで d はスリット間隔、 θ_1 は回折角である。

したがって、1次回折角は

$$d \sin \theta_1 = \lambda$$

の関係を満たす。

2次の波面は、あるスリットから来る光が2波長分だけ余計に進んだあと隣のスリットから来る光と同位相になるときに作られる。

上と同じように考えると、回折角を θ_2 として

$$d \sin \theta_2 = 2\lambda$$

である。

一般に m 次の波面は、ひとつのスリットから来る光が m 波長分だけ余計に進んだあと隣のスリットから来る光と同位相になるときに作られる。

m 次回折角を θ_m として $d \sin \theta_m = m\lambda$ となる。

$$d \sin \theta_m = m\lambda,$$

$\theta_m = m$ 次回折角
 $d =$ スリット間隔（中心の間隔）
 $\lambda =$ 光の波長

8 問

解

(a) $\lambda = 640 \text{ nm}$, $m = 1$, $\theta_m = 22.6^\circ$

$$d \sin \theta_m = m\lambda \text{ より } d \sin 22.6^\circ = 1 \times 640 \times 10^{-9} \text{ m}, \quad \therefore d = 1 \times \frac{640 \times 10^{-9}}{\sin 22.6^\circ} = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}$$

(b) $\frac{d}{\lambda} = \frac{1.67 \times 10^{-6}}{640 \times 10^{-9}} = 2.62 \therefore \text{最高次数} = 2$

中央に現れる 0 次, すなわち回折していないビームのスポットの両側に, 2 個ずつ回折光のビームが並ぶ.

(c) $m = 2$ すなわち 2 次の回折角 θ_2 は $d \sin \theta_2 = 2\lambda$ から決まる. $\therefore \sin \theta_2 = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2 \times 640 \times 10^{-9}}{1.67 \times 10^{-6}} = 0.776$, $\therefore \theta_2 = 50.9^\circ$

9 電磁波のスペクトル

光は電磁波のスペクトルの一部分にすぎない。

表には電磁波のスペクトルの他の部分も示した。

どの波長の電磁波でも真空中を約 300000 km s^{-1} の速さで伝わるが、この光速を c で表す。

10 赤外線

赤外線

可視光のスペクトルはほぼ 700 nm までで、それより波長が長くなると深紅から黒になってしまう。

可視光のスペクトルの端をわずかに通り越したところに、ガラスの温度計の球の部分に黒く塗って置くと温度の上昇が見られるはずであるが、これは赤外線による。

赤外線は約 700 nm (= 0.7 μm) から約 0.1 mm (= 100 μm) の波長域の電磁波である。

赤外線の発生

どんな物体も赤外線を出している。

高温の物体ほど表面からたくさんの赤外線を放出する。

さらに高温となり光り出せば表面から赤外線に加えて可視光も放出される。

低温になると赤外線も少なくなり、波長がもっと長い電磁波の割合が多くなる。

冷凍倉庫に入ると、身体から放出される赤外線の量が部屋の壁から受ける量より少ない。

その結果として身体の内部エネルギーが失われる。

実は、失われるエネルギーの量としては、空気が体に触れ対流によって冷たい熱を奪う効果のほうが通常はずっと大きい。

赤外線の吸収

赤外線の吸収量は、銀メッキの表面のほうが、黒塗りの面より少ない。

また、滑らかで輝く表面のほうが、ツヤ消しで粗い表面より少ない。

赤外線をよく吸収する物体はよく放出し、吸収しにくい物体は放出しにくい。

これが理由となって、温めた物体をピカピカのアルミ фольドでくるみその外側を断熱材で覆うと、そうしなかったときよりも内部の熱エネルギーを長く保持できる。

赤外線の検出

赤外線を検出できる電子的なセンサーがあり、侵入警報器などで使われている。

たくさんの微小なセンサーを配列して赤外線画像を検出する暗視カメラをつくり、あるいは人工衛星に積んだりする。

赤外線をういた暗視カメラは地上でも暗闇で人間や動物を「見る」ために使う。

これは背景と身体で温度が違うことを前提としている。

赤外線写真用の特別な赤外線フィルムもある。

普通のガラスは約 2.5 μm より長い波長の光を吸収するので、これより長波長で使えるレンズを作るには、ガラス以外の透明な物質たとえば水晶や特定の結晶あるいは液体などを用いる。

赤外線の用途

波長が約 1 μm の赤外線はデジタル信号を光ファイバーで送るのに使われる。

この赤外光の振動数は 3×10^{14} Hz 程度であり、マイクロ波の 10000 倍も高い。

マイクロ波やラジオ波にくらべて振動数が高いのでデジタル信号として送れるデータが多くなる。

たとえば、放送衛星と地上の間のマイクロ波回線は TV のチャンネル数個分を送れるが、光ファイバーではもっと多くのチャンネルを送れる。

赤外線は加熱に使われる。

たとえば、ハロゲン調理器では反射板と透明板の間に小型のハロゲン電球があり、通電すると電球からの赤外線は透明板を通過したあとフライパンに吸収される。

赤外線は、たとえば自動車ボディの吹きつけ塗装後の乾燥など、工業用の乾燥機としても使われる。

11 マイクロ波

マイクロ波は波長が約 0.1 mm から 0.1 m 程度の範囲の電磁波である。
大気による吸収がなく見通せる 2 地点間の通信に用いられる。
金属により反射され、非金属によりある程度吸収される。

マイクロ波の発生と検出

マグネトロンは強いマイクロ波を発生するように設計された真空管である。
電子レンジのマグネトロンは振動数 2.45 GHz のマイクロ波を発生する。
この振動数の電磁波は食品内部に浸透して水の分子に吸収され、食品を内側から加熱する。
通信など安定した振動数が必要な用途にはクライストロンという別種の真空管や半導体素子を使ってマイクロ波を発生する。
マイクロ波は点接触のダイオードで検波した電流を敏感なメーターや増幅器で読み取ることができる。
衛星放送にもマイクロ波が使われるが、受信には専用の半導体素子を使っている。

マイクロ波の用途

マイクロ波は食品の加熱や綿のような絶縁体の乾燥に使う。
電子レンジではマイクロ波が食品内部に入って加熱する。
このとき食品をのせる皿に導体の部分があると高電圧が生じて危険なので、絶縁体の皿を使う。
火花放電から火事になる恐れがあり、また導体で反射されたマイクロ波が部品を壊すからである。
レンジ内部の食品を回転するのは、内壁で反射したマイクロ波が定在波をつくり節ができるからである。
節の位置では食品にマイクロ波のパワーが行かないので、レンジの中で食品を回転させ全部が暖まるようにする。
マイクロ波は通信に使われる。
その理由は、顕著な吸収なしに大気中を伝わること、ラジオ波に比べて回折の効果が小さいのでビームを一定の方向に送り出せるからである。
地上局と人工衛星の間のデジタル通信に用いたり、地上の 2 地点間で塔や丘の上に送受信用のパラボラアンテナを設置して通信する。
マイクロ波の振動数は 10 GHz 程度なので、電線やラジオ波にのせた通信よりも多量のデジタル信号を送れる。

ラジオ波は波長が 0.1 m~1 m より長い電磁波であり、ラジオや TV 放送、さらに携帯電話や緊急警報の通信に利用される。

ラジオ波のスペクトルは図のように分割される。

ラジオ波の発生と検出

図 1 に示すように、高い振動数の交流電圧を適切な送信アンテナに加えるとラジオ波が発生する。

アンテナ内部の電子は強制的に往復運動させられ、その結果として周囲の空間にラジオ波が発生する。

ラジオ波の振動数は交流電圧の振動数と一致する。

ラジオ波が受信アンテナを通過するとき、アンテナ内部の電子が強制的に往復運動させられ、交流の電圧が発生するのでこれを検知する。

ラジオ波の用途

ラジオ波は大気あるいは宇宙空間を通して信号を送るのに使われる。

図 2 のように、大気上層に電離層がある。

電離層は太陽から放射される微粒子や紫外線により大気中の酸素や窒素等のガスが電離されてプラスとマイナスに帯電したイオンの雲が地球の上空に形成されたもので、電波を反射したり、進路を曲げたりして空間波をつくる。

高度約 50km の D 層は太陽からの紫外線によるもので波長が長い長波を反射する。

E、F 層は太陽からの放射微粒子によりつくられる。

E 層は高度約 100km で中波の進路を曲げて地上に降ろす役目をする。

F 層の高度は約 200km あり、昼間は F1 と F2 に分かれるが夜間に合体して 1 つの層となる。

F 層は短波の進路を曲げて地上に降ろす。

周波数が高くなるほど高い電離層で反射される。

超短波やマイクロ波はすべての電離層を突き抜けるので地上波しか利用できない。

人工衛星は電離層より高い軌道を持つので電離層を突き抜ける超短波やマイクロ波が使用される。

より高い周波数のミリ波を宇宙通信に利用すると大気中の雨による減衰が大きくなる。

夜間に遠くの中波放送が聞こえるのは D 層内の減衰が少なくなり、D 層を突き抜けて E 層で反射された中波の空間波が地上に届くから遠くの放送が聞こえるようになる。

ラジオ波でアナログ信号を送る通信には主として次の 3 つの方法がある。

振幅変調(amplitude modulation, AM)はラジオの音声やアナログテレビの映像信号を送るのに使われ、搬送波の振幅の変化を信号とする。

日本では長波の放送はなく、中波と短波の AM 放送がある。

ラジオの 1 つのチャンネルが音声信号の大半の振動数を伝えるには約 4 kHz の帯域が必要である。

このとき通信に用いるラジオ波の振動数の上下に約 4 kHz ずつ計 8 kHz 帯域をとる必要があるため、日本の法律では 9 kHz となる。

一方、テレビの 1 つのチャンネルは映像信号のために約 8 MHz の帯域をとるので UHF のバンドで (数チャンネル用意するには) 400 から 900 MHz が必要となる。

周波数変調(frequency modulation, FM)は、搬送波の振動数を音声信号により変調する (周波数と振動数は同じ

内容だが、FM を振動数変調とは言わない) .

パルス符号変調(pulse code modulation, PCM)はパルス列で信号を送るが、現在は日本国内の放送に使われていない.

地上波デジタルテレビは MPEG という符号化を使う.

13 紫外線

紫外線は、可視スペクトルの紫よりも先にある波長が約 400 nm から 1 nm⁺の電磁波である（+10 nm より短い波長を X 線に分類することもある）。

紫外線は目に害となり、太陽光の紫外線は日焼けや皮膚がんの原因である。

紫外線の発生

太陽は天然の紫外光源である。

地球の上層大気にあるオゾン層は太陽から来る紫外光のフィルターだが、大気中に放出された化学物質（たとえば フロンガス）のためにこの層のオゾンが減少し憂慮されている。

夏に戸外に出るときは、肌を紫外線から保護するために適切なクリームの使用が推奨される。

太陽灯(医療用水銀灯)やある種の放電管も紫外線を出す。

紫外線の検出

紫外線があたると蛍光染料は光る。

これらの染料の分子は紫外線を吸収して可視光を出す。

のような染料を含む粉石けんは、衣類に紫外線があたると発光するから、太陽光のもとで「白よりもっと白く」見せる効果がある。

写真のフィルムは 200 nm までの紫外線に感光する。

光電管も紫外線の検出に利用される。

光電管では、金属のカソードに紫外線があたると電子が放出され、これが微小電流計を流れる電流となる。

紫外線の用途

1. 盗難防止用のマーカーペンは、備品やお札に塗るものだが、紫外線を当てたときにだけ見えるインクを含んでいる。
蛍光ペンで書いたものは紫外線があたると目立った表示になる。
2. 高出力の紫外線ランプはインクを速く乾燥させるのに使う。
は紫外線で温まりにくく、インクだけに吸収される。

14 X線とガンマ線

波長が1 nmより短い電磁波はX線かガンマ(γ)線だが、X線はX線管や高温のプラズマあるいは放射光施設で、また γ 線は放射性崩壊で発生する。

X線と γ 線は発生の物理的な過程の違いによる分類であり、波長領域が重なる。

X線と γ 線は、原子にあたると電子をはじき飛ばしてイオンができる。

イオン化を起こす電磁波は生体の細胞を傷つけるので有害である。

X線管では、非常に高い電圧で加速した電子が金属ターゲットに衝突し急停止する。

その結果、電子があたった位置からX線が発生する。図にX線管の構造を示す。

不安定な原子核がより安定な状態に変わるとき放出する放射線は3種類あり、それらをアルファ線、ベータ線、ガンマ線という。

アルファ線は紙や薄い金属フォイルで止められるが、ベータ線を止めるには数ミリメートルの鉛が必要である。

ガンマ線はさらに透過する能力が高く、数センチの鉛が必要である。

X線と医療

X線は内蔵や骨の写真撮影に使われる。

これはX線が体組織を透過しやすく骨は透過しないことによる。

図は、腕の骨折のX線写真(レントゲン写真)だが、遮光した写真乾板かフィルムを腕の向こう側におき、こちら側からX線をあてる。

骨はX線を吸収するが周囲の組織は透過するので、フィルム上に骨の影ができる。

骨折していればX線写真でそれが見える。