サイエンス・サマーキャンプ

光の進み方を見てみよう*

八戸工業大学　基礎教育研究センター　川本清**

太陽の光にあたると暖かく感じます。また，太陽電池を使うと電気を取り出すことができます。太陽からの自然光でなくとも，蛍光灯や発光ダイオードを光源とした植物工場や，部屋の灯りで利用できる電卓もあります。光は，物体を温めたり，光合成を起こしたり，電気を作り出すなど，エネルギーを運んでいます。エネルギーを運ぶ光が，空間的・時間的に変化している様子は情報も含んでいます。

私たちは，景色を見ることで周囲の環境を理解したり，友人の表情や仕草からその人の感情をおもんばかったりしています。ものが見えるのは，太陽光や電灯のような光源があり，光源からの光や，壁や天井，床などから反射した光源の光が，人の顔や，部屋の中の物などで反射し，そのような光が目に届くからです。光源のない真っ暗な部屋に入ると，反射光がないので何も見えません。暗くしても見える，という時は扉の下から光が差していたり，電気製品のパイロットランプが点いていたりしていませんか。視覚は空間的な光の分布を知覚化したものです。「百聞は一見に如かず」，ともいうように，私たちは光を通して情報を得ているのです。狼煙や手旗信号，鉄道で使われていた腕木信号などは，煙や手旗，腕木の変化の様子を，光を通して目でとらえることでおこなう通信です。携帯電話のカメラで２次元バーコードを読み取るのも，面上に広がったドットの分布の様子を光の変化としてとらえる通信です。光の明滅を使う発光信号は，時間的に変化する光の様子に情報を埋め込んでいます。

以下では光の進み方について概観した後，光を使って情報を送受信する機器の作製について述べます。

1　反射　直進する光

光は，均質な空間を一直線に進み続けます。光が物体の表面あるいは物質の境界面に当たると，向きを変えて跳ね返ります。この様に光の向きが変わる現象を反射といいます。反射を簡単な方法で記述するために，光線を考えます。光線とは光の経路を表す直線で，光のビームは平行な光線の集まりと考えることができます。

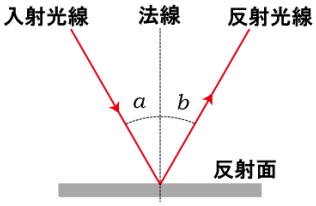


図１　光線の反射

光線の反射は図１に示す様な方法で起こります。反射面に垂直に立てた直線を法線といい，法線と入射光線とのなす角を入射角と呼びます。反射光線は，入射光線が反射面に当たった点に立てた法線を軸として，入射光線を対称に映したところに現れます。この法線から測った角度を反射角と呼びます。つまり，入射角 a と反射角 b は等しく，また，入射光線と反射光線は，法線を含む同一平面内に含まれます。これを反射の法則といいます。

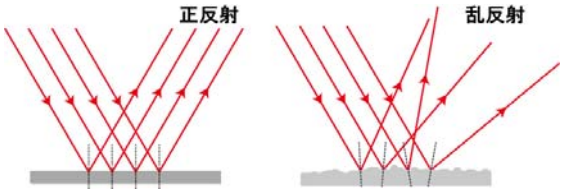


図２　正反射と乱反射

鏡の様に非常に滑らかな面では，平行な入射光線は平行な反射光線になります。このような反射を正反射といいます。正反射では，反射面は反射の法則に従い光線の進行方向を一様に変化させます。反射光線を見込むと，反射面ではなく入射光線をさかのぼった方向の像が見えます。滑らかでない面で反射した光線は平行ではなくなります。この場合も反射の法則は成り立ちますが，反射面が滑らかではないため反射方向がまちまちになります。この様な反射を乱反射(拡散反射)といいます。図２に正反射と乱反射の様子を示します。この紙面で起こっているのは乱反射です。

ものが見えるのは，光がものに当って反射するからです。夜間に照明された室内では，透明な窓ガラスが光を反射して鏡の様になります。ところが，昼間はその窓ガラスが透き通って見えます。窓ガラス自体には昼も夜もなんら変わりがありません。透明に見える昼間でも，窓ガラスは室内の光を反射しています。しかし，昼間は屋外から窓ガラスを透過して部屋に入ってくる光の量が多いので，反射光をおおい隠してしまいます。夜になると，屋外からの透過光が少なくなり，室内からの反射光がよく見えるようになります。

湖などの広く静かな水面に映る景色をカメラに収めると，景色が水面に反射し鏡に映したかのような写真を撮ることができるでしょう[1)]。そのような写真があれば，上下を逆にして見比べてみましょう。どちらが本物か，どういったことに注意すれば見分けがつくでしょうか。水面に入射する光の一部は水中にも侵入します。この様子を表す光線を透過光線といいます。

月が光っているのは太陽の光を反射しているからですが，もし月面が鏡のようになめらかで，正反射であるならば，月面で反射した光はとある決まった方向に進んでいくことになります。地球が反射光線の方向にある時だけ，反射光を見ることができ，月面に映っているのは太陽の像，という事になります。実際に私たちが見ている月の像は「うさぎの餅つき」などと例えられるように，なんらかの模様が見られ，一様ではありません。過去には月は完璧な球面であると考えられていた時代もありました。月面に影のようなものが見えていても，それは感覚が人を欺いているから，などと考えていたようです。17 世紀のはじめには，イタリアのガリレオ・ガリレイがその頃実用化された望遠鏡を使って月面を観察し，図 3 のようなスケッチを残しました[2]。彼は月にも山や谷があり地球表面によく似ていることや，月の山の頂に太陽の光があたる様子を観察し，月までの距離や月の大きさについても検討していました。彼は観察や実験に基づいて自然を説明しようとする，現在の科学にもつながる方法をとりました。

さて，月面での太陽光の反射は，正反射でしょうか，乱反射でしょうか。

図 3　ガリレイの月面のスケッチ[2]

2　屈折　曲がる光

光がガラスや水の様に透明な媒質に当ると，図 4 のように，一部が反射し，一部が透過します。光が境界面に垂直に当るときを除いて，透過した光は進行方向を変えることがわかります。このように，波が別の媒質の中へ入るとき進行方向を変える現象を屈折といいます。入射光線に対して，媒質の中で進行方向を変えた光線を屈折光線，媒質の境界面に立てた法線からはかった屈折光線の角度を屈折角と呼びます。　光がたとえば空気から水またはガラスに斜めに($a>0°$)入ると，光線は法線の方へ「折れ曲がる」ように屈折 ($b<a$，つまり屈折角は入射角より小)します。

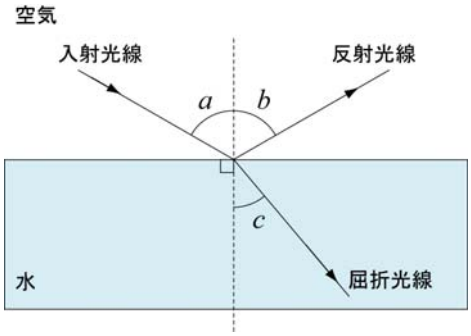


図 4　光線の屈折

光の屈折の様子は，無色透明なアクリルケースの中に水を入れ，側面からレーザポインタなどの光を入射することで観察できます[3]。ケースの外側，左上の空気中から入射した光は水中で屈折し進行方向が変化しています。さらに写真下側でケースを出て空気を進む光線は入射光線に平行な向きに進んでいます。この写真では光線を見やすくするため底面に近いところに光を通しているので，ケースのエッジ部分で一部乱反射した光があることや，アクリルケースの壁面を透過する際にも屈折があることに注意してください。

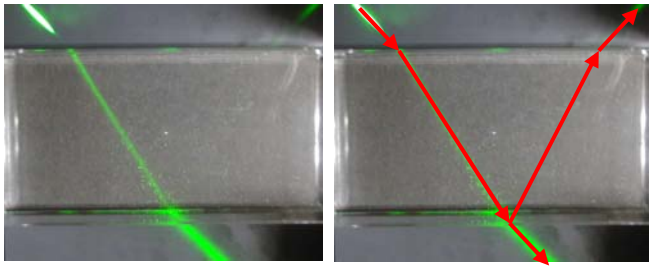


図 5　水による光の屈折。右図は光の進行方向を示すため矢印を描いたもの。

このような屈折が生じるのは，媒質中を進む光の速さが媒質の物理的性質によって異なるからです。たとえば，水中の光の速さは空気中あるいは真空中の光の速さの約 75%になります。媒質中での光の速さの違いが屈折を引き起こす理由を考えるため，光の屈折と同様の現象として海岸に打ち寄せる波を考えましょう。海面を進む波は，水深が浅くなるほど遅く進む性質があります。そのため，砂浜に向かって遠くから斜めに打ち寄せる波は，岸に近づくと波面が海岸線に平行になってきます。水深の深いところでは平行に進んできた波面が，水深が浅い海岸に近い部分に差し掛かった部分から遅く進むようになり，波面の進行方向が変化します。最後は海岸線に平行に寄せる波となります。

光の場合，海の水深にあたるものは光が進む媒質の性質になります。真空中の光の速さ c と媒質毎に異なる光の速さ c_m との比を，その媒質の屈折率 n と呼びます。

$$\textbf{屈折率}\ n = \frac{\textbf{真空中の光速}}{\textbf{物質中の光速}} = \frac{c}{c_m} \quad .$$

c ，c_m ともに同じ単位の量なので，屈折率 n は単位のない（無次元）の数になります。

光がたとえば水から空気の様に，屈折率の大きい媒質から小さい媒質に入ると，光線が法線から遠ざかるように屈折します。この様子は図 5 の下方，光が水中から空気中へ進んでいるところでも確認でき

ます。光線の進み方を見ると，光線を逆にたどってみてもよさそうです。図６に模式的に光線を逆進させた様子を示します。

屈折率の大きい媒質から小さい媒質に入るタイプの屈折では，入射角が大きくなるとおもしろいことが起こります。屈折光線が法線から大きく遠ざかり，入射角がある特別の角度（臨界角）になると，屈折角が 90°になり，屈折光線は２つの媒質の境界に沿って進むことになります。入射角が臨界角より大きくなると，境界面が鏡のようになって，光は全て反射され屈折光がなくなります。このような現象を全反射といいます。図 7 にこの様子を模式的に示します。水中の光源から出た光のうち，赤い矢印で示した光は，境界面である水面に全反射を起こす臨界角で入射しています。このため，屈折光線は空気中にはでていかず，境界面に沿って進んでいきます。全反射の臨界角を超えた入射角の光線は，境界面で全反射され，入射光のすべてが反射されています。

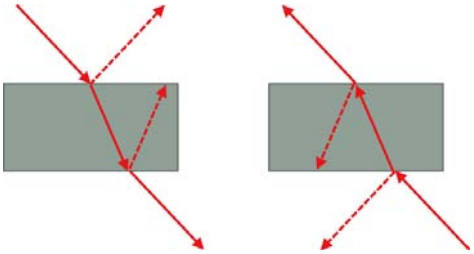


図６　光線の逆進

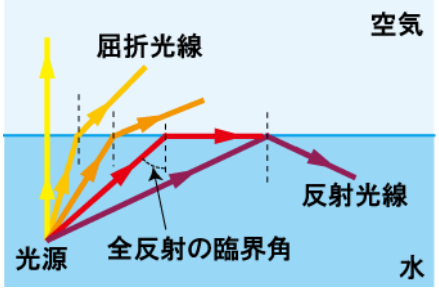


図７　光の全反射

全反射を利用するとガラスでできたプリズムを鏡として使うことができます。これは，一眼レフカメラのファインダーに利用されていました。また，宝石のダイヤモンドは，内部に入った光が屈折と全反射を適切に起こして上面から出てくるようにカットされ，美しく輝きます。

全反射の別の例として，細長い媒質中を全反射を繰り返し伝わる光があります。空中に流れ出し放物線を描く水の細い流れの中に光を通すと，細流となった水の内面で光が全反射し，水の流れに沿って光が曲がる様子を観察できます。このとき，水の流れは絶えず変化し，全反射の条件も常に保たれるわけではありませんので，水流の側面からも光が散乱されます。同様に噴水の水を下から照らすと美しいイルミネーションになります。プラスティックや細いガラスでできた「ライトパイプ(光の管)」を使うと，効率よく光の進行方向を変えることができます。図８にアクリル製のライトガイド中を進む光の様子を示します。より細く柔軟なライトガイドを利用して直接には光の届かない部分の観察をするファイバースコープに応用され，機械などの奥まった場所の観察の他，医療において人体の検査にも使われています。

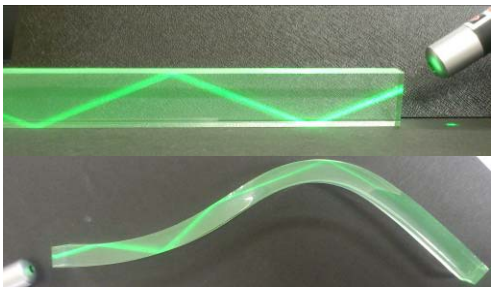


図８　アクリル製のライトパイプの中を進む光

細長い繊維状のガラスでできた光ファイバーも全反射を利用しています。一般的な光ファイバーは，図９に示すように，中心部にコアと呼ばれる屈折率の高い中心部分を，コアより屈折率が小さいクラッドと呼ばれる部分でくるんだ構造になっています。光ファイバーの端面から入射した光はコアの部分から外に出ることなく他方の端面まで伝わります。全反射を利用したライトパイプや光ファイバーは，理想的には入射したすべての光がそのまま伝わると考えられますが，実際には様々な要因で光は徐々に散逸していきます。実際，1960 年代のガラスファイバーは 1m の間に光の量が 1/4 程度にも減少するものでした。1966 年にカオ（Charles Kao）らによって，光ファイバーに使うガラスの純度を向上させると，実用に耐える小さな伝送損失（1km で 1%の損失）の光通信が可能になることが示されました。こののち，光ファイバーの改良が重ねられ，現在のように各家庭への電話線にも光ファイバーが用いられるまでになりました。カオはこの業績により 2009 年のノーベル物理学賞を受賞しています[4]。

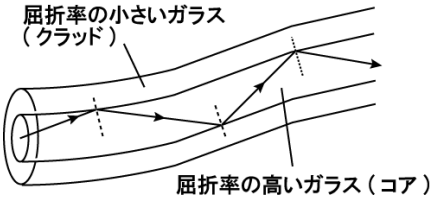


図９　光ファイバーの模式図

3　反射防止構造　入り込む光

カミソリの刃は最も厚い部分の厚みが 0.1mm 程度で，そこから刃先に向かって角度の小さな傾斜がついています。このカミソリの刃を多数重ね合わせてみましょう。刃の部分は微小な傾斜面が向かい合った谷の様な構造になります。細い針を数千本束ねても同様の構造を作ることができます。

図 10　カミソリ刃を重ねたビームダンパー

これらを刃先・針先の側から見てみましょう。図 10 の写真では灰色に見えている下辺の部分です。谷の部分で前方反射する光は，反射を繰り返す間に減衰し，外に向かって出てくる光は少なくなります。

蛾の眼は多数の個眼が集まった複眼になっていますが，個眼の表面に 1 万分の 1mm ほどの凹凸が作りこまれています。これにより反射を少なくし，眼に入射した光を効率よく取り込むことができます。蛾の眼の構造（モスアイ構造）をまねて，外部光の反射を抑えた液晶パネルやカメラレンズなどが開発されています。

4　光送受信機をつくろう

光は太陽電池で利用されているようにエネルギーを運びますが，エネルギーを伝えるものは情報の伝達にも利用することができます。光通信の歴史は古く，1880 年にベルが光電話の実験をしています[5]。図 11 に実験の様子を示します。太陽光を光源とし，反射面から数 100m 離れたところで光検出器で電気信号を取り出しています。反射面に話かけると反射面が振動し，反射光の量が変化します。その変化の様子が電気信号に復元されてスピーカーを鳴らしています。

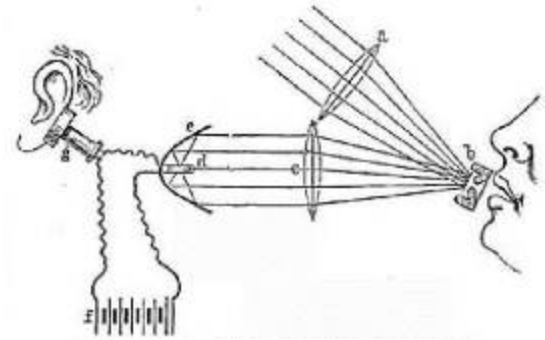


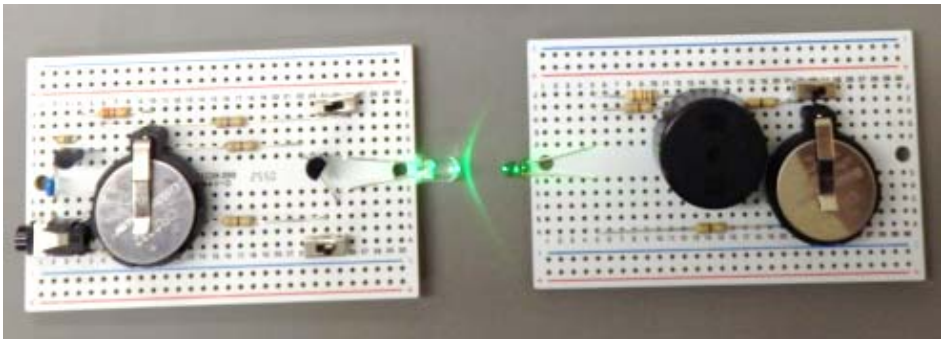
図 11　ベルの光線通信[5]

ここでは，メロディ IC や音楽プレイヤーなどが奏でる音楽の信号を光に変換する光発信機と，この光信号を捕らえてスピーカーを鳴らす光受信機を作製します。電子工作を楽しんで，そのあと光の伝送実験をおこないましょう。製作の概要を次ページ以降に示します。

○使用した部品の一覧[6]

	部品名	単価(目安)	一人当たり必要数	一人当り単価（参考値）
	秋月電子通商　http://akizukidenshi.com/catalog/default.aspx			
1	照度センサ（フォトトランジスタ）　NJL7502L　2個入	100	1	50
2	超高輝度5mm緑色LED　36cd15度　OSPG5111A－34（10個入）	300	1	30
3	圧電スピーカー（圧電サウンダ）（22mm）PKM22EPPH2001－B0	50	1	50
4	トランジスタ2SC1815L－GR－T92－K　60V150mA　（20個入）	100	1	5
5	片面ガラス・ユニバーサル基板（ブレッドボード配線パターンタイプ）	70	2	140
6	カーボン抵抗（炭素皮膜抵抗）　1／4W0Ω　（100本入）	100	7	7
7	カーボン抵抗（炭素皮膜抵抗）　1／4W220Ω　（100本入）	100	1	1
8	カーボン抵抗（炭素皮膜抵抗）　1／4W1kΩ　（100本入）	100	1	1
9	カーボン抵抗（炭素皮膜抵抗）　1／6W100kΩ　（100本入）	100	1	1
10	絶縁型ラジアルリード型積層セラミックコンデンサー0．01μF50V ±10%5mm　10個入	100	1	1
11	小型スライドスイッチ　1回路2接点　SS12D01G4（4個入）	100	3	75
12	リチウム電池　CR2032　ゴールデンパワー製	40	2	80
13	.ボタン電池基板取付用ホルダー　CR2032用（小型タイプ）	50	2	100
14	3．5mm小型ステレオミニジャック　基板取付用	50	1	50
	共立電子　http://eleshop.jp/shop/			
15	メロディIC(カッコウ) UM66T-32L._　等	40	1	40
	千石電商　http://www.sengoku.co.jp/			
19	3AYI-CTMP　カモン　φ3．5ステレオミニプラグケーブル　1m　SS－10	158	1	158
	ダイソー			
20	ミニコンテナケース	105	1	105
	計			894

参考
1)　例えば，J. T. シップマン「シップマン自然科学入門　新物理学　増補改訂版」（第 3 刷）学術図書出版（2004）「第 7 章　波動現象と光学」中の図 7.5 など。
2)　ガリレオ・ガリレイ「星界の報告」(岩波文庫)。図は http://en.wikipedia.org/wiki/File:Galileo%27s_sketches_of_the_moon.png を引用。
3)　笹野義博，「水の屈折率の変化を観察する実験道具の工夫」，日本物理教育学会東北支部第 24 回研究大会(2009 年 10 月 24 日)。
4)　例えば"The Nobel Prize in Physics 2009 - Illustrated Presentation". Nobelprize.org. 1 Oct 2012. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/illpres.html 英語だが，図を見るだけでも受賞の意義を理解する助けになる。この年のノーベル物理学賞は CCD の発明も対象で，まさに現在につながるイノベーションを起こした技術に与えられたといえる。
5)　A.G. Bell, Proceedings of the American Association for the Advancement of Science, Vol. 29, pp.115-136, 1881. 図は http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Bells_Photophon_Schema.jpg を引用。
6)　サイエンス・サマーキャンプで使用した部品。同等品に置き換え可能。部品入手には，秋月電子通商(http://akizukidenshi.com/catalog/default.aspx)，共立電子(http://eleshop.jp/shop/)，千石電商(https://www.sengoku.co.jp/)の各通販サイトを利用した。

＊　本稿は 2013 年 8 月 17 日にサイエンス・サマーキャンプ（青森県・総合学校教育センター）にて実施した実習内容を再構成したものである。

＊＊　川本清，八戸工業大学 基礎教育研究センター　〒031-8501 八戸市妙字大開 88-1
Tel: 0178-25-8261, Fax: 0178-25-3309, E-mail: kawamoto@hi-tech.ac.jp