

中学校理科の「光」に関する教材・教具の開発

—物理の考え方に触れる教材と、屈折の法則を無理なく理解できる「水中射的」—

奥沢 誠・小暮 匠・黒澤 伸元・梁瀬虹太郎

群馬大学教育実践研究 別刷

第28号 57～63頁 2011

群馬大学教育学部 附属学校教育臨床総合センター

中学校理科の「光」に関する教材・教具の開発 — 物理の考え方に触れる教材と、 屈折の法則を無理なく理解できる「水中射的」 —

奥 沢 誠¹⁾・小 暮 匠²⁾
黒 澤 伸 元³⁾・梁 瀬 虹太郎¹⁾

- 1) 群馬大学教育学部理科教育講座物理学教室
- 2) 高崎健康福祉大学高崎高等学校
- 3) 上野村立上野中学校

Development of a teaching material concerning with optics in science of a junior high school

— A teaching material with which students are exposed to concept of physics,
and a spearing-game “suichu-chateki”
by which students can reasonably understand the law of refraction —

Makoto OKUSAWA¹⁾, Takumi KOGURE²⁾,
Nobuchika KUROSAWA³⁾, and Kohtaro YANASE¹⁾

- 1) Department of Physics, Faculty of Education, Gunma University
- 2) Takasaki University of Health and Welfare High School
- 3) Ueno Junior High School

キーワード：物理教育、幾何光学、フェルマーの原理、屈折の法則、視点

Keywords：physics education, geometrical optics, Fermat's principle, the law of refraction, viewpoint

(2010年10月29日受理)

1 はじめに

21世紀はフォトニクス世紀とも言われている。フォトニクス（光技術）とは、フォトン（光子、光の粒子）を利用するテクニック（技術）のことで、その代表例は、光通信、ディスプレイ、光メモリなどに関する技術である。フォトニクスは、光ファイバーはもちろんのこと、光素子、量子暗号などの領域で今後ますます発展するものと予想されている。

このような状況の下で、「光」科学は物理学において力学、電磁気学、統計力学、量子力学及び物質科学

とともに重要視されており、そのため必須の入門分野になっている。これは初等中等教育課程にも一貫して反映されており、平成元年告示の学習指導要領以来「光」分野の内容に大きな差異が見られない^{1), 2)}ことから分かる。そこで、本研究では、中学校理科の「光」分野に注目する。

平成20年3月に告示された中学校学習指導要領では理科の授業時間数が290時間から385時間と大幅に増加し、これに伴って多くの内容が追加されたが、光の内容にはほとんど変化がなかった。これには、光分野の体系の特徴が反映されているものと推測される。他の

物理分野と異なり、「光」分野では二つの考え方でそれぞれの現象を説明する。つまり、反射、屈折を幾何光学、干渉、回折を波動光学で説明する。このことから、内容を追加する場合は幾何光学から波動光学に領域を拡大せざるを得ず、内容量が一挙に大幅増加してしまうという事情が一因で、中学校の内容は幾何光学の範囲で留まっているものと考えられる。

中学校の「光」の内容が幾何光学の範囲で閉じていることは逆に、物理の考え方を教授する上で大きなメリットとなる。前掲の力学などの物理の分野は非常に大きな体系をなしており、中学生が全体を垣間見ることすら困難なものであるが、幾何光学はそれ自体閉じた体系として扱えるし、幾何光学の基本原則は分かり易い。このことに基づいて、「光」学習を、科学に関する基本的な見方を訓練する題材とすることが期待される。そこで、基本原則から関連する諸現象を統一的に説明するという醍醐味を味わいながら物理の方法論を学ぶ例として、光の直進性、反射、屈折を取り上げる。

光の反射・屈折現象を理解する上で、現象の説明と目で観測した結果とが感覚的に一致せず、このことが理解を妨げている場合がある。この原因の一つは、光は通常の身の回りの生活において、物を観察する手段であって、観察される対象物ではないことを峻別しないことにある。物を観察するには光を用いる。その手段自体である光を観察するのはどうすればよいか。やはり光を用いるしかないが、これがなかなか難しい。客観（理論）と、主観（目で観測した結果）の間の関係を明らかにしなければ混乱が起こる。客観と主観を峻別し、屈折の法則を無理なく理解できる教材・教具が必要である。

本研究では、中学校の「光」の内容が幾何光学の範囲で閉じていること、光は物を見る手段であるという事実に着目し、光に関する教材、教具の開発を行う。

本論文では、第2章で平成20年告示の学習指導要領から「光」の学習に関する部分を纏め、第3章で幾何光学の基本原則、光の反射・屈折の法則の導出、及びそれらに基づく中学校で物理の考え方に触れるための教材を紹介し、第4章で、客観と主観を峻別し、屈折の法則を無理なく理解できる教具「水中射的」の開発について述べる。最後に第5章でまとめを行なう。

2 学習指導要領での光の取り扱い

小中学校で取り扱われる光の内容は、小学校第3学年で光の直進・光の反射・集光、光の当て方と明るさや暖かさ、中学校第1学年で反射・屈折、凸レンズの働き、である。平成元年版と平成10、11年版とでは「光」の分野の内容に大きな差異が見られなかったが、平成20年版（平成20年3月告示）もこれらの版と大きな差異はないといえる。これから学習指導要領では「光」の重要度は変わらないことが読取れる。20年版の光に関わる部分を抜粋して下に示す。

小学校学習指導要領

第2章 各教科

第4節 理科

第2 各学年の目標及び内容

[第3学年]

2 内容

A 物質・エネルギー

(3)光の性質

鏡などを使い、光の進み方や物に光が当たったときの明るさや暖かさを調べ、光の性質についての考えをもつことができるようにする。

ア 日光は集めたり反射させたりできること。

イ 物に日光を当てると、物の明るさや暖かさが変わること。

中学校学習指導要領

第2章 各教科

第4節 理科

第2 各分野の目標及び内容

[第1分野]

2 内容

(1)身近な物理現象

身近な事物・現象についての観察、実験を通して、光や音の規則性、力の性質について理解させるとともに、これらの事物・現象を日常生活や社会と関連付けて科学的にみる見方や考え方を養う。

ア 光と音

(ア) 光の反射・屈折

光の反射や屈折の実験を行い、光が水やガラスなどの物質の境界面で反射、屈折するときの規則性を見いだすこと。

(イ) 凸レンズの働き

凸レンズの働きについての実験を行い、物体の位置と像の位置及び像の大きさの関係を見いだすこと。

3 光の直進・反射・屈折

3-1 幾何光学とフェルマー (Fermat) の原理

光は本来、波動性、粒子性などの性質をもつ素粒子であるが、身の回りで接する可視光(狭義の光で、以後これを光とよぶ)は、電磁気学の基本法則であるマックスウェルの方程式で充分記述できる、振動数が特定の範囲内にある電磁波である。しかし、小学校、中学校ではこれらの光の本性に立入ることなく、光を幾何学的な光線の集まりと考え、光の直進・反射・屈折などの媒質中での進み方を学ぶ。すなわち中学校までは、幾何光学の範囲で扱える光の性質が教科内容となる。

直進・反射・屈折などの光の性質はフェルマー(Fermat)の原理^{3), 4)}により統一的に説明される。フェルマーの原理は、1点から出て他点に達する光線は、所要時間が最小となるような経路、あるいは、光路長を極小にとるような経路をとるというものである。ここで、光路長とは、光線が進んだ幾何学的距離に媒質の屈折率を掛けたもの、また、媒質中のある点における光の伝播速度を v 、真空中の光速度を c とすると、媒質のその点における屈折率は $n = c/v$ で定義される。フェルマーの原理によれば、光が ds 部分を通過するのに要する時間を dt とすると、光線が点Pから点Qに達する経路は

$$\int_P^Q dt = \int_P^Q \frac{ds}{v} = \text{最小、}$$

あるいは

$$c \int_P^Q \frac{ds}{v} = \int_P^Q n ds = \text{最小}$$

で決定される。

3-2 光の直進・反射・屈折

光線は一樣な媒質中では直進し、異なる2つの媒質の境界面では反射・屈折の法則に従って、進行方向を変える。以下で、これらの性質をフェルマーの原理から導く。

(1) 光の直進性

一樣な媒質中は屈折率が一定であるから、光が伝播する速さは一定になる。2点間の最短距離は2点を結ぶ線分の長さであり、したがって2点間の光の運動の所要時間は、この線分上を直進するのが最短である。

(2) 反射の法則

光が鏡で1回反射される条件の下で、フェルマーの原理を用いる。

図1に示すように、P点から発せられた光が鏡の上のR点で反射され、Q点に到達することを考える。光が同一の媒質中にあるとすれば、光は一定の速さで、直進する。P点からQ点までの光路の幾何学的長さは、距離 \overline{PR} と距離 \overline{RQ} の和である。R点を適当に選べば、この和は最小になり、PQ間を最短時間で進む光路となる。P点の鏡の面に対する像をP'点とすると、距離 $\overline{P'R}$ と \overline{PR} は等しいので、 $\overline{P'R}$ と \overline{RQ} の和が最小になればよい。これは、R点がP'点とQ点を結ぶ線分が鏡の面と交わる点であり、入射角 θ_1 と反射角 θ_2 が等しいことを意味している。これは反射の法則である。

(3) 屈折の法則

2つの異なる媒質が接している1つの平面の境界で光が透過する条件の下で、フェルマーの原理を用いる。

図2に示すように、媒質I中のP点から発せられた光が境界面上のR点で屈折して進行方向を変え、媒

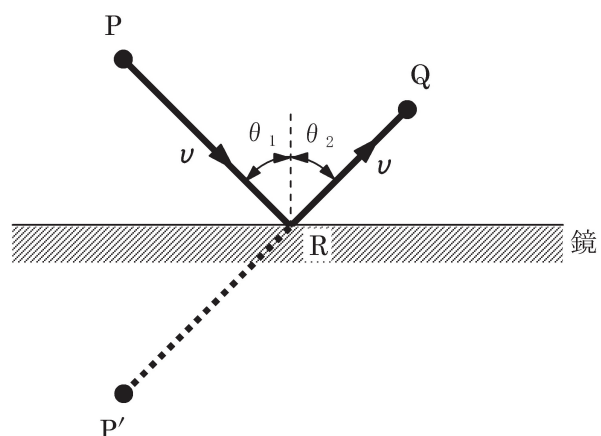


図1 光の反射の説明図

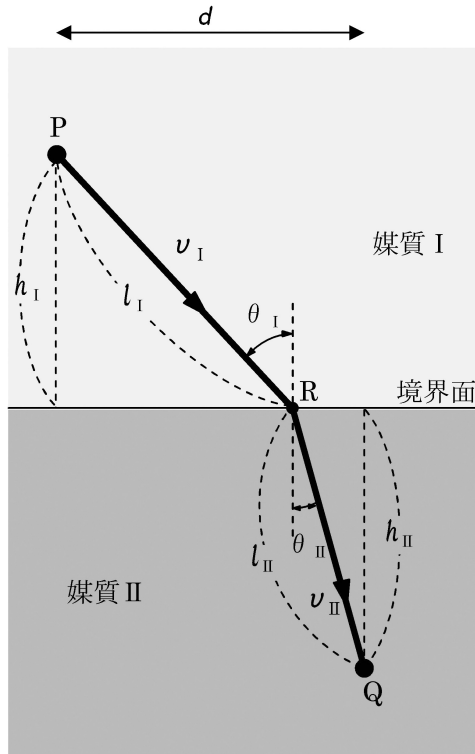


図2 光の屈折の説明図

質 II 中の Q 点に到達することを考える。ここで、距離 PR、RQ をそれぞれ l_I 、 l_{II} 、入射角を θ_I 、屈折角を θ_{II} で表わす。また、 h_I 、 h_{II} はそれぞれ P 点および Q 点の境界面からの距離、 d は P、Q 間の境界面に沿った方向の距離とする。

このとき、(1)フェルマーの原理により、 $P \rightarrow R \rightarrow Q$ の光路は、通過するに要する時間 t が最小、すなわち、 $t = l_I/v_I + l_{II}/v_{II} = (\text{最小})$ となる光路である。 $P \rightarrow R \rightarrow Q$ の光路の通過時間 t は R 点を移動させると変化する。この変化は

$$\delta t = \delta l_I/v_I + \delta l_{II}/v_{II}$$

で与えられる。境界面上で R 点を移動させるとき、光の通過時間 t が最小になる点では $\delta t = 0$ であるから、

$$\delta t = \delta l_I/v_I + \delta l_{II}/v_{II} = 0.$$

(2)ただし、以下の3個の境界条件がある。

$$l_I \cos \theta_I = h_I, \quad l_{II} \cos \theta_{II} = h_{II}$$

であり、 h_I 、 h_{II} は R 点の位置によらない一定値をとる。

$$l_I \sin \theta_I + l_{II} \sin \theta_{II} = d$$

であり、 d の値も R 点の位置によらない。

これらの条件下で、境界面上で R 点を移動させると、 l_I 、 l_{II} 、 θ_I 、 θ_{II} は変化する。R 点のある位置から少し移動させたとき、それぞれの変化量は δl_I 、 δl_{II} 、 $\delta \theta_I$ 、 $\delta \theta_{II}$ とする。これらの小さな変化に対し、上記の3条件は

$$\delta(l_I \cos \theta_I) = \delta l_I \cdot \cos \theta_I - \delta \theta_I \cdot l_I \sin \theta_I = 0,$$

$$\therefore \delta l_I = l_I \tan \theta_I \cdot \delta \theta_I.$$

$$\delta(l_{II} \cos \theta_{II}) = \delta l_{II} \cdot \cos \theta_{II} - \delta \theta_{II} \cdot l_{II} \sin \theta_{II} = 0,$$

$$\therefore \delta l_{II} = l_{II} \tan \theta_{II} \cdot \delta \theta_{II}.$$

$$\delta l_I \cdot \sin \theta_I + \delta \theta_I \cdot l_I \cos \theta_I + \delta l_{II} \cdot \sin \theta_{II} + \delta \theta_{II} \cdot l_{II} \cos \theta_{II} = 0$$

となる。これらの上2式を用いて、第三式から $\delta \theta_I$ 、 $\delta \theta_{II}$ を消去すると

$$\sum_{i=I,II} \left(\sin \theta_i + \frac{\cos \theta_i}{\tan \theta_i} \right) \delta l_i = \frac{\delta l_I}{\sin \theta_I} + \frac{\delta l_{II}}{\sin \theta_{II}} = 0.$$

(1)、(2)の結果から $\delta \theta_I$ 、 $\delta \theta_{II}$ を消去すると、

$$\frac{\sin \theta_I}{v_I} = \frac{\sin \theta_{II}}{v_{II}}$$

を得る。媒質中での光の速度は光の屈折率 n に逆比例するので、上式から

$$n_I \sin \theta_I = n_{II} \sin \theta_{II}$$

を得る。ただし、 n_I 、 n_{II} はそれぞれ媒質 I、II における光の屈折率である。この式はよく知られている光の屈折の法則である。

3-3 中学校で物理の考え方に触れる題材—光—

3-1で示したように中学校までの光の学習内容は幾何光学の範囲に限られる。またこれは、3-2で示したように、比較的簡単にフェルマーの原理から統一的に説明できる。このことに基づいて、「光」学習を、科学に関する基本的な見方の重要な要素である、論理的な思考の訓練の題材とすることが考えられる。

小中学校の理科の内容は、科学に関する基本的な見方や概念の定着を図れるように構成されている。物理分野もこの例に漏れないが、科学に関する基本的な見方のなかでも重要な要素である論理的な思考を訓練する内容は、萌芽的段階に留まる。近年、仮説実験授業が当たり前のようになり、通常の授業や、研究授業でも行われているが、この発見的ともいえる方法のみで、物理分野の思考方法が完結しているわけではない。原理から演繹的に現象を理解する過程は不可欠である。中学生が物理の体系を捉えてニュートンの法則や、マックスウェルの方程式から諸現象を論理的に理解することは無理があるものの、原理から演繹的な思考を通して論理的に現象を理解する訓練を行うことは必要である。このような点を考慮すれば、「光」は中学生が物理の考え方に触れる絶好の題材であると期待できる。

3-4 原理から反射・屈折現象を説明する例

二つの原理から、簡単な推論によって、光の重要な性質が導かれる。下記は、初学者向けに説明した例である。中学生でも、簡単な作図を行えば直進性と反射の法則は原理から容易に理解できる。ただ、屈折の法則については、定量的な導出に変分を用いるので、定性的な範囲に留めざるを得ない。

原理：ある点から出た光が別の点に届くとき、その光（線）は、かかる時間が一番短くなるような道を通る。

補助原理：媒質の屈折率 n は、真空中の光の速さを c 、その媒質中の光の速さを v とすると、
$$n = c/v$$
である。

光の直進性：光は直進する。

空気の中や水の中では、どこも同じ屈折率なので、速さは変化せず一定である。同じ速さで一番早くたどりつく道は直線である。

反射の法則：光は鏡で等角反射をする。

光が通るところはどこも同じ屈折率なので、速さは変化せず一定である。図1を参照にして、光源から鏡の上の反射点までの距離は、三角形の合同により、光源の像から反射点までの距離に等しい。従って、光源－反射点－光を受ける点の距離は、光源の像－反射点－光を受ける点の距離と等しい。光源の像－反射点－光を受ける点の距離は、これらの3点が一直線上にあるとき最短である。このとき、入射角と反射角は等しくなる。

屈折の法則：〔屈折率の大きい媒質の（入射あるいは屈折）角〕 < 〔屈折率の小さい媒質の（屈折あるいは入射）角〕

屈折率の小さい媒質内の光の速さは、大きい媒質内の光の速さより速い。速さが速ければ同じ時間で長い距離を進めるから、なるべく屈折率の小さい媒質内を長い距離通った方が時間を節約できる。このようにして、光の通る道は、光源と光を受ける点を結んだ直線より境界面と平行に近づく。これは、屈折率の小さい媒質の（屈折あるいは入射）角は大きくなることを示

している。逆に、屈折率の大きい媒質内はできるだけ通らない方が時間を短縮できるため、光の通る道は、光源と光を受ける点を結んだ直線より境界面と垂直に近づく。言い換えれば、屈折率の大きい媒質の（入射あるいは屈折）角は小さくなる。したがって、屈折率の大きい媒質の（入射あるいは屈折）角は、屈折率の小さい媒質の（屈折あるいは入射）角より小さい。

4 教材開発

一屈折の法則を無理なく理解できる「水中射的」一

日常の経験から私たちは、光は直進するという感覚を抱いている。その上で、目に届く光線を通して物を見る、言い換えれば、目に届く光線に基準を置いた視点に立って物を観測している。このようなことから、光が直進せず予期しない現象に遭遇すると、戸惑ったり錯覚を起こしたりする。光の屈折現象においても、目で観測したものから光が直進するとして出した結果と法則とが一致せず、混乱を起こし、これが屈折現象の理解を妨げている場合がある（写真1参照）。本研究では、主観的に真直ぐな光線と、多少の力では変形しない“客観的に”真直ぐな棒（剛体）とを対峙させることにより、光の屈折の様子（客観的視点）と棒が水面で折れ曲がる様子（主観的視点）を峻別し、かつ関連付けられる教材・教具を開発した。

視点の移動・変換は物理分野では速度や加速度の異なる点のものがあるが、それぞれ、特殊及び一般相対論に現れる。理科教育では天文分野の「自転・公転と天体の動き」での位置の異なる点の間の視点の移動の難しさが論じられている⁵⁾。

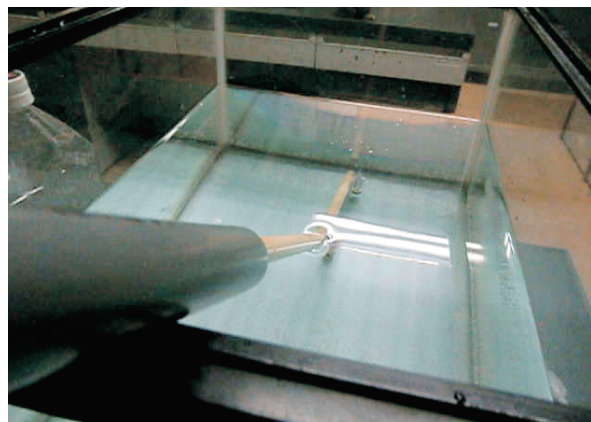


写真1 筒の設定の仕方。真直ぐな（剛体のはずの）棒（客観的視点）が屈折している（主観的視点）。



写真2 班ごとに水中射的を行っている様子

この教材の原型は、2000年8月26、27日に群馬県生涯学習センターにおいて開催された「青少年のための科学の祭典 群馬大会」⁶⁾において光の屈折現象を説明するために考案されたものである。会場に父親に伴われて訪れた小学校高学年と思われる男の子が照準を合わせた上で水中の標的を突くが、当たらない。ますます正確に狙いを合わせて繰り返すが当たらない。これを見ていた父親が「この××野郎！下手クソ。」と叫んだ。元気の良い親子だった。これ以来遊びを取り入れて子どもの興味・関心を喚起するなどの改良を行いながら、各地の科学教室で屈折の実験を行ってきた。この度、8月～9月に渋川市立北橋中学校の1年生2クラスで、光の授業の教材としてこの「水中射的」を用いた（写真2）結果高い教育効果が得られる⁷⁾ということなので、本論文で紹介することにした。

以下に、この視点の観点に立った教材・教具を紹介する。名称は「水中射的」とした。教具自体は単純なものであるが、子どもたちはゲームが好きで、どこでも授業前から興味・関心は高まる。材料は家庭や理科室など身の回りにあるもの、あるいはホームセンターなどで安価に手に入るもののみである。通常、標的は、魚型のタレ瓶を色分けして用いている。対象とする子どもの年齢層に対応して、レーザーを用いたり、水槽の側面を黒紙で覆ったりして、さまざまなバリエーションがあるが、ここでは、基本形のみを紹介する。

教具

名称：水中射的

材料：基本形は、水を入れる水槽（1個）、長めの棒（1本）、筒（1本）、筒を固定するスタンド（1個）、標的（2個）、標的を固定する吸盤（2個）、から構成される。

組立：(1)水を入れた水槽の傍に筒を取付けたスタンドを置く。(2)筒の一端を水面に向け、筒穴を通して水槽を覗くと水槽の底が見え、且つ筒穴に入れた棒が水槽の底を突くように、筒を配置する（写真1参照）。(3)水槽の底に2個の標的を吸盤で吸い付ける。吸い付ける位置は、(2)で覗いたとき見えた位置と棒がついた位置である。

実験方法：(1)手前の標的に照準を合わせる。

(2)筒に棒を入れて標的を突く。

(3)離れた側の標的に当たる。

(4)再び筒を覗いてみると手前の標的が見える。

射的遊びをしながら、水面での光の屈折の様子を体感させる。

これを教材として用いる場合、重要なことは、光が屈折する現象はレーザー光を通せば分かるが、それと目で見たときに棒が曲がって見えることが結びつか

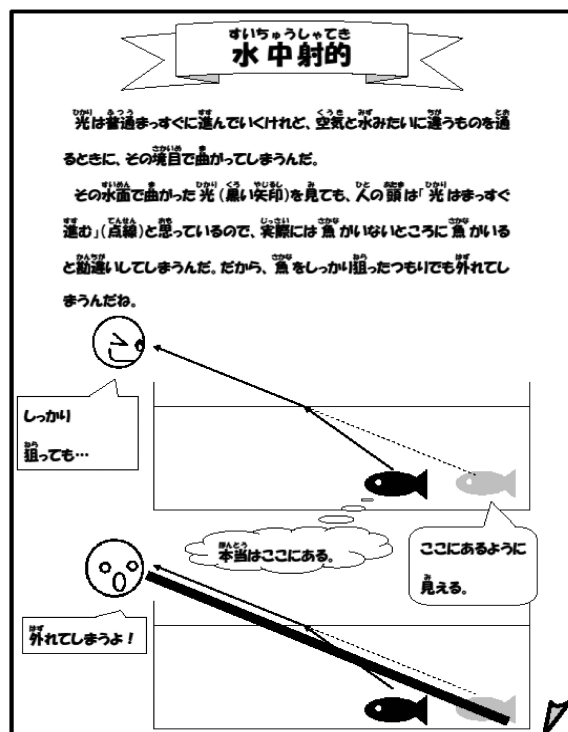


図3 科学教室用パンフレット

ないことを念頭に置くべきであると考えられる。本研究では、この教材を用いて、屈折した光に乗って（屈折しているのに真直ぐだと感じてしまう主観的視点で）、真直ぐな棒（客観的視点）を見れば、棒は水面上に折れ曲がっていることを納得し、屈折の法則と無理なく関連づけられる教材・教具を開発し、紹介した。図3は、この実験を行った子どもたちに配付したパンフレットである。低学年の児童もいるので、露わに視点移動には触れていない。

ここ数カ月の間では、高崎市立箕郷公民館の科学教室、前出の渋川市立北橋中学校の授業、第58回群馬県理科研究発表会に合わせた群馬県立総合教育センター玄関ホールでの科学教室で、この教材を用いた。対象者は年齢におおきな開きがあったものの、一様に興味深く、熱中して取り組んでいた。特に、群馬県立総合

教育センター玄関ホールでの科学教室では、高校生の参加もあり、考えが整理できたとの話が聞けた。

5 おわりに

中学校の「光」の内容が幾何光学の範囲で閉じているので、小さい領域ながらこの範囲で学問体系を見まわすことができる。これは、物理の考え方を教授する上で大きなメリットとなる。幾何光学はそれ自体閉じた体系として扱えるし、幾何光学の基本原理は分り易い。そこで、基本原理から関連する諸現象を統一的に説明するという醍醐味を味わいながら物理の方法論を学ぶ例として、光の直進性、反射、屈折を紹介した。

実際は屈折しているが主観的には真直ぐな光線と、多少の力では変形しない“客観的に”真直ぐな棒（剛体）とを対峙させることにより、光の屈折の様子（客観的視点）と棒が水面で折れ曲がる様子（主観的視点）を峻別し、かつ関連付け、屈折の法則の理解の一助となる教材・教具を紹介した。

参考文献

- 1) 過去の学習指導要領
(<http://www.nicer.go.jp/guideline/old/>)
- 2) 木村貴洋、奥沢 誠：群馬大学教育実践研究 第21号 75 (2004).
- 3) 物理学辞典編集委員会編：「物理学辞典」培風館、1969 (1984).
- 4) ファインマン著、富山小太郎訳：「ファインマン物理学Ⅱ 光熱波動」岩波書店、1 (1968).
- 5) 吉野晃男、岡崎彰、益田裕充、丹羽孝良：群馬大学教育実践研究 第27号 47 (2010), and references therein.
- 6) 群馬大学教育学部奥沢研究室：B19これって、にじ(虹)？、「青少年のための科学の祭典 群馬大会 実験解説集」、43 (2000).
- 7) 石川直紀：私信.

(おくさわ まこと・こぐれ たくみ・くろさわ のぶちか・やなせ こうたろう)

