

実験を物理教育にどのような取り込むか？

森本 雄一 兵庫県立東播工業高等学校 675-0057 兵庫県加古川市東神吉町神吉 1748-1
庭瀬 敬右 兵庫教育大学 673-1494 兵庫県加東市下久米 942-1

学習指導要領には目標として“観察、実験などを行い”と書かれているが、高校物理教育において生徒実験はあまり実施されていないのが現状である。今回、生徒実験の歴史を概観して、生徒実験の意義と問題点、その必要性を検討し、生徒実験の具体的な実践のための指針となる“現実的な基礎実験”を提案し、その実践例を示した。

キーワード：生徒実験、歴史、物理教育

1. はじめに

高等学校学習指導要領の理科の目標には、“観察、実験などを行い”とあるが、理工系の大学生を対象にした山崎らの調査¹⁾によると、高校での物理生徒実験の経験は、平均6.1回であり、2割の学生は生徒実験を1回も経験しなかったことが明らかになっている。最先端の科学研究において実験による探求や検証は不可欠であるにもかかわらず、学校教育において生徒実験はあまり実施されていないのが現状である。改めて考えてみれば、実験は物理教育において当然行われるべきものとしていたが、その根拠は明確ではなかった。本研究では、生徒実験の意義と問題点、その必要性を明らかにし、実験を物理教育にどのような取り込むかについて具体的な実践の指針を与えることを目的とした。これは「確かな学力」を重視する現在の教育において最も重要な課題の一つであると考えられる。

2. 物理教育における実験の状況

近代における教育は、国や自治体の施策として行われてきたものであり、産業発展を担う人材育成を必要とする社会からの影響が大きい。教育史を概観すれば、大正・昭和の、理科教育が奨励され生徒実験が盛んに行われた時期の後には、産業発展の時期が訪れている。鬼塚は、「かつては実験が奨励された。理科教育の意義や実験の意味を問うものはいなかった。その重要性は社会的にも教育的にも当然であった。」²⁾と述べている。生徒実験は、施設設備や実験器具に多額の費用がかかるため、財政的な問題に大きく左右されるものである。発展期の後、理科の授業時間数と投入される予算が減少し、それに伴い生徒実験は衰退していったことがうかがえる。物理教育に関わる、人材、時間、予算の三つが教育政策を通じて減らされてきた結果、経験豊富な教師、準備や実施にかかる時間、実験器具や消耗品の

購入費用を不可欠な条件とする、実験、特に生徒実験が行われにくくなってきたことに顕著に現れて来たのだと推測される。

3. 物理教育における実験の意義と問題点

自然科学における実験は、第一義には、
・自然に対して予想や仮説をもって意識的に問いかける行為（科学の方法としての実験）
である。この他に、理科教育においては、
・科学に対して興味・関心をもつ（面白実験）
・実験をすると理解しやすい（説明実験）
・物理法則を検証する（検証実験）
などがある。以下、これらの実験について、物理教育における意義とその問題点について検討する。

まず、最初に“科学の方法としての実験”を検討する。近代科学は、実験や観察によって得られた事実に基づいて推理を展開し、結論を導き出していくという研究方法をとる。中世までの権威や聖書に基づいた思弁と異なり、実験・観察された事実に基づき、帰納的・論理的に推理を進めるものである。科学教育においては、教科書の記述に基づいた学習だけではなく、生徒自身が自ら主体的に行った観察や実験結果に基づいて、帰納的・論理的に推理を進めるという科学の方法を、生徒自身が主体的に行うという意味で“科学の方法としての実験”は意義がある。しかしながら、“科学の方法としての実験”は、具体的な操作・観察・測定・グラフ化・考察などのスキルで構成されていると同時に、これらのスキルを活用して未知の問題を解決するという、科学的な方略を必要とする比較的高度な実験である。これらは不可分のものであり、“科学の方法としての実験”を行うためには、生徒がある程度の実験のスキルや科学的な方略を習得しているレベルであることが必要条件になるであろう。

面白実験は単元のはじめに導入実験として教師が演示することが多く、これから学習する内容について、生徒の興味・関心を高める役割がある。しかしながら、面白実験を多用しただけでは学習内容が深化せず、授業時間の浪費につながる懸念がある。

説明実験は現象や法則を分かりやすく説明するためのものであり、教科書を中心とした説明だけではイメージすることの難しい現象の認識に役立つが、生徒自身が実験を行なった場合に比べて実感に欠けるものとなりがちである。そのため、生徒実験への発展も考慮する必要がある。

検証実験は、主に教科書に書かれている物理法則を検証するものであり、生徒実験として行われている。定量的に物理量を測定し、物理法則を検証することを通じて、理解を深め、実験技術を習得することにも検証実験は役立つものである。実験の目的として“～が成り立つことを確かめる”という形で示されていることが多い。しかしながら、問題例として、高校の物理実験で、記録タイマーを使った重力加速度の測定を挙げることができる。筆者らの経験では、生徒が実験で求めた値は、かなりばらつきがあり教科書に記載されている値から10%程度外れていることが多かった。しかし、生徒は 9.8m/s^2 の値に近づけることを意識せざるを得ない。これは典型的な”データの理論負荷性”を持つ実験と考えられる。もし、実験結果が 9.8m/s^2 と異なれば、生徒は自分たちの実験結果を疑わざるを得ない。電磁式記録タイマーの実験に代表されるPSSC物理を日本に紹介した板倉自身が、“動力学をよりはんごつなものにするのに役だった”と批判している。³⁾また、単なる検証実験では、「既に科学者が時間をかけて研究し、確立されている法則を、なぜ時間をかけて検証しなければならないのか」と生徒に疑問を抱かせることになってしまうことを1978年に、石川が「実験無用論」⁴⁾で指摘している。同様な点は百年以上前に発見的教授法を唱えたアームストロングが、“法則の検証実験のように、生徒があらかじめ結果を知っているものは、生徒実験には向かない”と指摘している。⁵⁾

4. 生徒実験の効果の検討

一般に、生徒実験をすると印象に残り、生徒の理解が進む効果があると思われる。そこで、生徒実験の実践例からその効果を検討した。

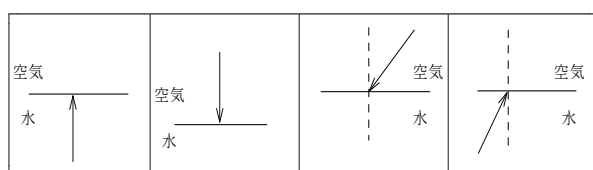


図1 境界面に入射した光線の進路を問う問題

図1は空気と水の境界面に光線が入射したあとのように進むか図に記入させる問題である。⁶⁾

T工業高校2年生182名に対して、2008年5月に、学習前調査としてこの問題に解答させた。その後、この問題に関連する生徒実験を行い、同じ問題を期末考査に出題し、実験の前後で正答率の変化を調べた。生徒実験は、個人実験として行い、ビーカーの外側にシールを張り付け、水を入れていくとシールが見えなくなるという現象について実験し、ガラスも水も透明なのに、なぜシールが見えなくなるのかを考察させた。(図2)

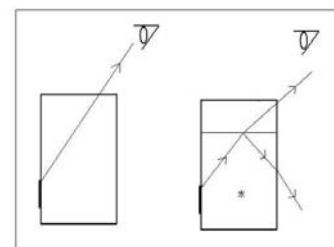


図2 水面における屈折と反射

また、この生徒実験の次の授業で、上記の4項目について、レーザーポインターの光線を用いて演示実験をした。

表1 実験の前後での正答率の変化

項目	実験前	実験後	差
水→空気 (垂直)	55%	63%	+8%
空気→水 (垂直)	52%	52%	±0%
空気→水 (斜め)	49%	65%	+16%
水→空気 (斜め)	31%	64%	+33%

実験の前後で正答率の変化を調べた結果を示す。(表1) 垂直方向では正答率はほとんど変化していない。水→空気、空気→水の双方とも、誤答のほとんどは、境界面で光線が屈折するように描いたものである。これは、“境界面に垂直に入射した光線も屈折する”という誤概念を生徒が持っており、教師が演示実験で説明しただけでは変化しにくいことを示している。しかし、空気→水(斜め)は+16%と上昇し、今回の生徒実験の内容に直接関わる、水→空気(斜め)に入射する場合については、実験前と比べ正答率は33%と大きく上昇している。実験自体は簡単であるが、生徒達は水を入れると見えなくなることに驚き非常に不思議に思いながら観察をしていた。特に印象深い実験であったから、記憶に残りやすかった可能性は考えられる。

その他、期末考査に出題した、シールが見えなくなる理由を図を描いて説明する問題は、182名中112名が正解し、正答率は60.2%であった。実験レポートの感想には、
 ・身近にある水がこんな不思議な現象を起こすので、すごくびっくりしました。

・とても不思議だった。よくわからなかった。とても頭を使う実験だった。

・もっと詳しく実験をしてみたいと思いました。

など、驚きと不思議を感じ意欲をもったというものが多かった。この実験は反射や屈折の現象を理解するのに役立つ、興味・関心を持たせるのに役立ったと推測される。

この実験は、実験に要する時間が1時間であることを勘案すれば、生徒実験が理解を進めた例であるといえる。

5. ”現実的な基礎実験”の提案

生徒実験は時間がかかり、準備や器具の経費が必要であるために、社会的な状況や入試制度などの影響を受け易く、衰退しやすい要因を内在していることを2章で論じた。3章では物理実験の意義と問題点を検討した。特に単なる検証実験を行う生徒実験は、その必要性に疑問を持たれる場合があることを指摘した。それゆえ限られた授業時間の中で、例えば回数が少なくても、実施する価値やその効果がある必要性の高い実験であれば、教育効果の高い実験として授業で用いられる可能性がある。これは、“現実的な基礎実験”というべきものである。そこで、これまでの議論と生徒実験の実践を踏まえた上で検討した、“現実的な基礎実験”が満たすべき条件を以下に示す。

【時間・経費・実験者最小】

- ・短時間で出来て、あまり費用がかからないもの
- ・操作が簡単で、試行錯誤が出来るもの
- ・個人実験か一組2人で行えるもの（体験性向上のため）

【内容不可欠】

- ・体験で得るべき重要な物理概念を含むもの
- ・対象に対し予想・仮説を持って問いかけるもの、または、生徒にとって未知であり、驚きや感動が得られるもの

生徒実験は、百年以上の歴史を通じて、様々な実験が工夫・考案され、教科書や実験書などに記載されている。また、教師はそれぞれの学校の生徒や時間数や実験器具の状況に応じて、実験を改良・工夫して実施している。時代が変わるにつれて、重要視される内容や、入手出来る材料や測定器も変わって来るからそれは当然のことである。しかし、様々な手が加えられ、方法が変わっていく中で、本来その実験が持っていた優れた要素が失われていく恐れがあり、常に生徒実験の有効性を検証し、精選していくことが、実験の教育的効果を発揮させるためにも重要であると考えられる。そこで、“現実的な基礎実験”が満たすべき条件をチェックするために、生徒実験設計評価表（表2）を考案した。

表2 生徒実験設計評価表

	プラス要素	マイナス要素
1	重要物理概念を含む	重要物理概念を含まない
2	予想・仮説がある	予想・仮説がない
3	生徒に未知	生徒に既知
4	不思議・驚きがある	普通・驚きがない
5	操作が易しい	操作が難しい
6	試行錯誤出来る	単発で繰り返せない
7	個人か一組2人	一組3人以上
8	短時間で出来る	長時間かかる
9	費用が安い	費用が高い
10	安全	危険を伴う

この表は、科学の方法として不可欠な内容を含んでいるか、時間、経費など実施しやすい方法であるかどうかと、いうことを事前に評価する目安となるものである。それぞれの条件を満たす場合をプラス要素、満たさない場合をマイナス要素とする。“現実的な基礎実験”を行う上で、この表を評価基準として、プラス要素を高めた実験を構築することが具体的な実験設計の指針となる。

6. ”現実的な基礎実験”の実践例

これまでに筆者らが”現実的な基礎実験”に該当するものとして行ってきたT工業高校の2年生物理IとH教育大学の授業における実践例をあげる。T工業高校の生徒は、大学入試で物理を必要としない。また、H教育大生は高校でほとんどの学生は物理を履修していない。

6.1 水波面の実験（高校）

6.1.1 目的

波は振動が伝わっていく現象であることと、波長、振動数、周期の関係を体感的に知ることを目的とした。波動現象に関する最小限不可欠な内容であり、水に操作を加えて意識的に観察することにより、重要な波動についての基本概念を体験的に取得することを目指した。⁷⁾

6.1.2 実験

蓋の部分が平らで透明な20cm×16cm×4cmの蓋付き寿司容器を使う。寿司容器の本体の底に白い紙を敷き、水波の像が見やすいようにする。透明な蓋を裏返し、本体の上に置き、水を1cm程の深さに入れる。部屋を暗くし、斜め横から電球の光を当てる。水波を発生させるには、直径1cmのプラスチック製の球がついたマップピンを割り箸の先に刺したものをを用いる。割り箸を持ち、マップピンの球で水面をリズムカルに打つと水波が発生する。

(1)円形波 水面を1回打つと波面が円形に広がっていくのが観察できる。打つ時間間隔を変化させることにより、振動数と周期、波長の関係を知ることが出来る。

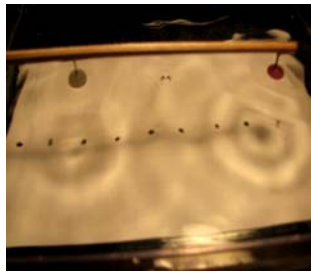


写真1 円形波の干渉

(2)円形波の干渉 割り箸に10cm離してマップピンを2本刺す。割り箸を目玉クリップで挟み水面上で上下させて波を発生させる。それぞれの球で発生した円形波が重ね合わされ干渉し合う様子が観察できる。(写真1)

(3)ドップラー効果の波面

割り箸に刺したマップピンで水面を叩き、波を発生させながらゆっくり進行方向に動かす。進行方向の波面間隔は短く、反対方向の波面間隔は長くなるのがわかる。(写真2)

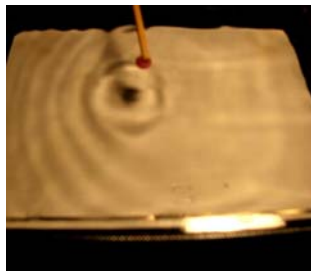


写真2 ドップラー効果の波面

6.1.3 生徒の反応

183人の実験レポートに記された感想を多い順に記す。
 ・波の動きがよく分かった(47人)・波がきれいだった(28人)・実験が面白かった(12人)・これからももっと実験したい(12人)・図を描くのが難しかった(10人)・周期と波長の関係がわかった(9人)・驚いた・すごかった(各8人)などである。

6.1.4 実験実践の評価

非常に簡単な道具立てで操作も簡単な実験であるが、生徒は飽きずに熱心に取り組んだ。この実験には事前の予想や仮説を特別に設定していないが、常識的に生徒が持っている先入観が予想や仮説になっている。水槽の下におかれた紙に、光の輪が投影され等速度で広がっていく様子は見ている美しく飽きない。何度も繰り返し水面を叩き、波面を観察しながら、現象に引き込まれていくことがこの簡単な実験を進める動機になっている。感想から、多くの生徒が、波に興味を持ち、周期と波長の関係を体感的に修得したと思われる。

6.2 ストロー天秤 (大学)

6.2.1 目的

紙コップとストローと竹串を用いて簡易な天秤(ストロー天秤)を作って実験し、支点からの距離や重りの個数を測定することで、左側と右側の、

(力点にかかる重りの重さ) × (支点からの腕の長さ) の値が等しくなることをとらえて、力のモーメントの釣

り合いの式を導き出す。

6.2.2 実験

ストロー天秤の製作

(1)紙コップとストローに錐で穴を開け、竹串を通して左右が釣り合うようにストローの長さを調節する。

(写真3)



写真3 ストロー天秤

(2)ワッシャの数を1個対2個のように適当に選択して、ワッシャをストローの左右に通して、左右のワッシャが釣り合う場所を試行錯誤で探し出し、釣り合ったときの竹串(支点)からワッシャまでの距離を定規で測り記録する。左右のワッシャの位置を変えて釣り合う場所を探して、それぞれの距離を測定する。3箇所以上での釣り合う位置を探し出して距離の測定を行なう。

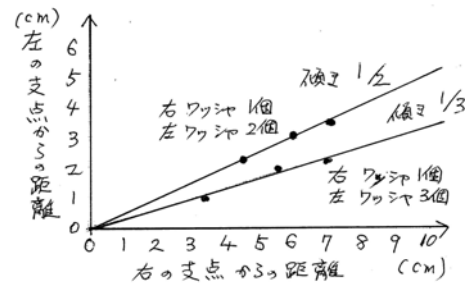


図3 ストロー天秤の実験結果例

(3)釣り合った左右のワッシャの支点からの距離をそれぞれxとyとしてグラフにプロットし(図3)、直線が現れることを確認して、その傾きを測定する。その結果から左右の(力点にかかる重りの重さ) × (支点からの腕の長さ) が等しいという関係式を導く。

6.2.3 学生の感想

- ・実験によって、重りの個数と傾きが一致し面白かった。
- ・自分で釣り合う位置を見つけることで期待値からのずれは出るものの、距離と重さの関係に驚きをもてるようになると思った。
- ・身近な物を使って手作りの実験装置を使うことで、より本質的な理解につながるということに気づきました。
- ・今回の授業で、これについて自分が意外と理解できていなかったと思いました。

6.2.4 実験実践の評価

この実験は、大学2年生の授業で個人実験として行なった。力のモーメントは、高校物理Iで学習するが、今回受講した大学生はほとんど高校で物理を履修していない。授業をして感じたのは、直線運動と共に運動の基礎である回転運動を引き起こすモーメントについて、きちんと教えられていないということである。小学校の6学年で

「てこの規則性」を学習するが、市販されている実験器具では、2cm ごとにフックがあり、それにおもりを引っかける形になっている。おもりの個数と中心からの距離が読み取りやすいが、単純であるために簡単に答えが予想されてしまい、興味関心や意欲がそがれてしまう。それに対してこの実験では、おもりの数は決まっているが、釣り合いの位置は任意に求めなければならない。釣り合いに失敗して、片側に回転した場合は、その回転方向でのモーメント（てこ）が勝ったことが実感をもって経験できる。綱引きの場合の直線運動では反対方向に同じ力で引いた場合は、釣り合って動かないことと同様に、回転運動でも時計方向と反時計方向に回転させようとする力（モーメント）が釣り合えば、回転せず静止するということがわかる。小学校から現れるてこから高校で現れるモーメントに関係した生徒実験であり、実験が簡単であるので、解析部分の取り扱いを変えることによって、小学校から大学レベルまで行える実験となる。

7. まとめと提言

生徒実験の歴史を概観し、生徒実験が実施されにくい要因やその衰退の問題点を指摘した。生徒実験の意義と問題点、その必要性を検討し、生徒実験の具体的な実践のための指針を提案した。特に、授業時数が限られた中で、生徒も教師もぜひ実施する価値があると思うような実験を“現実的な基礎実験”と呼び工業高校と大学で実践を行った。

水面波の実験は、手を動かして簡単な操作を繰り返しながら波動を作り出し、周期と波長の関係を体感的に認識していく実験である。生徒は決められた操作だけをするのではなく、周期を早めたり遅くしたり、試行錯誤的に任意の操作を加え、その結果「こうすれば、こうなる」という確かな経験を得て、その結果を図に描き文章に書き記していき、振動数と波長の関係を定性的に理解した。

ストロー天秤の実験では、科学者が行なっている実験測定、解析、規則の発見 ($N=rF$) に至るまでの研究の過程を短い時間で疑似体験することができた。いずれの実験も操作自体が簡単で、操作に対する反応が確実に得られる。多くの生徒や学生は、集中力を持続して取り組むことが出来、その結果、波や、てこの規則性を自ら体験を通して発見することが出来た。実験の感想に「また実験したい」「違う実験をやってみたい」と書いた生徒も多く、これらの実験を通じて、科学の面白さを伝えることができるかもしれない。これは、“現実的な基礎実験”が、シンプルな操作の繰り返しであり、生徒一人一人が行えるので、それぞれのペースで納得いくまで実験出来るという特徴から得られる結果であろう。このように“現実的な基礎実験”は、生徒

それぞれが努力を持続し、自主的に独自な方法を模索して行えるような生徒実験になっている。生徒は実験を熱心に行い、感動している様子がアンケートからも確かめられている。創造的態に関する研究^{8,9)}で、これらの実験態度や感動体験は、創造的な態度と関係することが示されており、このような自由度を高めた基礎実験を行うことが、未知のことに挑戦する生きる力の育成に繋がることも期待できる。

物理教育が始まって以来、様々な実験が考案され実践されてきた。しかし、技術の進歩や社会の変化に伴い、教育における実験のあり方も変化しなければ、現在の生徒に適用出来ない。時間数が減少し、予算も十分でない現在、今回我々が提唱した“現実的な基礎実験”のように目的を明確にした実験設計を行い、一人でも多くの生徒が、実験をとおした学習を経験していくことが、大切であると筆者らは考えている。

8. おわりに

本誌で実験の意義が特集された1998年当時と比べて、理科教育、特に物理教育における生徒実験の置かれている状況は、さらに厳しいものになっている。「当然」に疑問を持ち調べるのが科学の存在意義でもある。「なぜ実験しなければならないのか」「どのように実験しなければならないのか」を明確にして、実験を通してでしか獲得することのできない重要な“何か”を喪失してしまわないための授業設計が今求められている。

引用文献

- 1) 山崎敏昭他, 物理教育, 55-1, 2007.
- 2) 鬼塚史朗, 物理教育, 46-5, 2007.
- 3) 板倉聖宣, 理科教育史資料 5, p148, 1987.
- 4) 石川孝夫, 学ぶ側の論理・教える側の論理, 物理教育, 26-1, 1977.
- 5) 沖花 彰, 大学生の『光の反射・屈折に関する理解度』調査, フォーラム理科教育 No5, 2003.
- 6) 寺川智祐編, 科学教育そのダイナミクス, 大学教育出版
- 7) 森本雄一, なぜ生徒実験をしなければならないのか-高校における物理授業実践からの考察-, 兵庫教育大学院修士課程平成 20 年度学位論文, 2009.
- 8) 豊島禎廣, 庭瀬敬右, 中学生の創造的態についての研究 - 「原体験」と学力との関連を通して -, 理科教育学研究, 41, p1-8, 2000.
- 9) 西康隆, 庭瀬敬右, 小学生の創造的態についての研究 - その特長と学年変化 -, 理科教育学研究, 44, p21-28, 2003.