

教養教育物理学実験の教材開発

工学部 矢野 教・企画室 浅妻昭榮

Development of Physics Experiments for General Education

Koji HONMA, Kyo YANO and Syoei ASATSUMA

The typical characteristics in physics is that it has been developed through the way of both theory and experiment compensating each other, and so the physics education program consists of two teaching forms, Lecture and Experiment. In General Education curriculum, however, the position and valuation of Experiment hours are not well established yet even today.

The present report describes physics experiments that have so far been carried out for General Education, and searches for the direction of improvement and development of teaching materials.

Key words: Development, Physics experiments, General education, Lecture and experiment, Teaching materials

1. はじめに

教養教育物理学実験（以下物理学実験という）の実施は教養課程の制度化に始まる。当初の実施の主体は理学部物理学科であったが、昭和39年度に教養部が制度化され、実施の主体が教養部に移行された。今回、教養課程と教養部廃止により、自然科学系教養教育の責任学部である理学部に実施の主体が再び移ることになった。

この間、科学技術は急速な進歩をとげ、入試制度の改正もあって学生の状況も大きく変わってきている。物理学実験においても、こうした時代の変化に対応するために、その時々の実施主体の手により改善の試みがなされてきた。たとえば、主な取り組みとして、実験指導書の作成、教養部での6大学共同研究「物理学一般教育改善のための教材開発」、新しい実験種目の開発、実験装置の改良等があり、また、実験指導書の改訂は小規模ながら不断に続けられてきた。しかしながら、最近（教養課程廃止後）とくに、学生の受講状況が顕著に変わり、適切な対応を急ぐ必要が生じてきている。

物理学は、自然科学の中でも特に理論と実験と言う二つの側面が補完する関係にあり、物理学教育は講義と実験と言う二つの授業形態から構成される。しかし、実験の実施は実験室、実験装置、実験担当等に物心両面での多くの負担を必要とすることから、前進的に取り組むためには、そのための条件を整備し、あるいは基盤を確立してゆくことが必要になる。教養課程が廃止され、3年が経過した今日なお、教養教育での実験教育の位置付けが必ずしも明確になっていないのはこうした事情と無縁ではない。ここでは、筆者の視点で見た物理学実験実施の現状を紹介し、その改善のための教材開発の試みにふれる。

2. 物理学実験の現状

物理学は自然界に起こる様々な現象に目を向けながら、その現象を支配している自然法則を追求してきた。その結果、今日では、原子・素粒子を対象にした微視的世界から、宇宙の構造をも含めた巨視的世界までを対象にしている。物理学が自然界から見いだして確立した自然法則（物理法則）は実験あるいは観測によっ

て確かに裏打ちされており、その法則に関係する物理量は数理に依って結ばれている。物理学実験は、ある特定の物理法則が主に関係するように物理的条件を構成した実験装置を用いて、この物理法則と物理的条件を実験的に確認して行く作業である。このために、実験では実験値に対する吟味を欠くことができず、測定に伴う誤差をも考慮した検討が必要となってくる。以下に実験実施の現状を見ることにしよう。

2. 1. 実験課題

現在、実施されている実験課題は、次の16課題である。(以前用意されていた、37課題から現在の実施体制に合わせて選ばれた。実験指導書(平成7年度版)の目次より)

I 序論

- 1 実験を行う場合の態度
- 2 測定
- 3 計算値の誤差の算出
- 4 最小自乗法
- 5 電気実験のための予備知識

II 物性

- § 1 長さの測定
- § 2 ボルダの振子による重力加速度の測定
- § 3 ヤング率の測定
- § 4 液体分子の結合エネルギーの測定 I
- § 5 液体の粘性係数の測定

III 熱

- § 6 混合法による固体の比熱
- § 7 気体の熱膨張
- § 8 液体分子の結合エネルギーの測定 II

IV 光

- § 9 顕微鏡の倍率及び微少な長さの測定
- § 10 回折格子による光の波長の測定

V 電磁気

- § 11 ブラウン管オシロスコープの実験
- § 12 電気抵抗の温度による変化
- § 13 電解質溶液の電気抵抗の測定
- § 14 電位差計

§ 15 トランジスタの特性

§ 16 GM管による β 線の最大エネルギーの測定

いくつかの課題を例にとり、その内容と目的に触れておこう。I序論は、実験の実施方法の説明と一般的注意、ならびに、測定値と誤差、データ処理時の誤差の伝搬等、実験時に最低限必要とする予備知識を扱っている。II物性から、V電磁気まで16の課題を分野別に分類している。「§1長さの測定」は精度の異なる3種類の測長器を使って直6面体の体積を測定するのであるが、精度の異なる測定で測定値と誤差の関係の整合性が見て取れる。誤差を理解する上で欠かせない課題であり、例外として、この課題のみ実験開始の初日に全員が行う。他の15課題は2週目以降に割り振られる。曜日による授業時間数の違いと、授業の実施方法の違いがあつて、学生は6課題もしくは12課題程度に取り組む。「§2ボルダの振子による重力加速度の測定」では、単振り子の長さや周期の測定から重力の値が誤差0.04%で求まるように工夫してあり、比較的簡単な実験で運動法則をかなりの精度で確認できる。「§4液体分子の結合エネルギーの測定I」は水の表面張力の測定であるが、「§8液体分子の結合エネルギーの測定II」での水の蒸発熱の測定と共に巨視的物量の測定で終わるのでなく、微視的視点にたった分子間力としての解釈を求めている。「§7気体の熱膨張」では気体の体積を一定に保持した状態での温度と圧力の関係を測定するのであるが、グラフの外挿から絶対零度を半定量的に見積もることができる。「§10回折格子による光の波長の測定」は波の回折・干渉現象を扱い、光の波長を誤差0.06%で求める。また、精度の異なる実験値の平均操作を扱っている。「§11ブラウン管オシロスコープの実験」は波形観察装置としてのブラウン管オシロスコープの取り扱いを主にしているが、学生は自分の母音の波形を楽しんで観ている。「§14電位差計」は熱現象と電気現象が関連した熱電気現象としての熱電対の熱起電力を、電圧の精密測定法である零位法で測定する。熱電対を温度センサーとした、温度の電氣的測定法を扱っている。「§16GM管による β 線の最大エネルギーの測定」は、放射線の検出器としてのGM管の機構と放射線の計測、

ならびに、確率的に起こる現象の測定値の誤差評価を扱う。使用している放射線源の強さは手に持っても自然放射能のおよそ100倍で、もちろん密封されている。ほとんどの学生には放射能を扱うのは初めての経験である。

2. 2. 実験の実施

実験装置は「§ 1 長さの測定」以外、1 課題につき 2 台が用意され実験室に配置されている。この中で「§ 10 回折格子による光の波長の測定」は微弱な光を観察する必要があり、また、「§ 11 ブラウン管オシロスコープの実験」はマイクロフォンを使用するために、周囲からの雑音（逆に周囲への雑音）をさける必要があり、共に暗室に配置され、それ以外の課題は 3 つの実験室に分散配置されている。受講者全員が同じ課題に取り組むことができればよいのだが、限られた面積の実験室、限られた予算の中での実験装置の整備と保守、限られた要員での実験準備等の制約の中で、必然的に採用されている実験室の構成である。また、I 期・II 期ともに授業がほとんど全ての時間（Ⅲ、Ⅳ限）に配置されている状況の中で、実験準備を遅滞なく遂行してゆくためには、実験装置の整備と保守が欠かせない。このための準備室と工作室がある。実験は原則として学生 2 名が 1 組（人数調整の関係からまれに 3 人の組ができる）で行うので、聴講定員の基本は最大で 60 名である。

実験の実施方法は I 期と II 期で異なる。I 期は主として工学部の 2 年次学生を対象にしており、2 週間で 1 課題が割り振られる。これは、学生が実験の第 1 週で、実験指導書と別に用意された参考文献により、課題の目的、実験方法と原理、基礎データや課題に関連する現象の調査等の事前の下調べを行い、第 2 週の実験に十分な予備知識をもって臨む事を企図している。下調べや実験結果についてはその都度ノートを点検し、学生は実験の翌週に次のような項目に準じたレポートを提出する。

1. 表題：実験課題、日付、天候、室温、氏名、共同者の氏名
2. 目的
3. 測定の原理

4. 実験結果

- a. 測定値
- b. 誤差の評価
- c. 結果

5. 考察：結果の検討、実験中特に気付いたこと、失敗した場合その原因、実験から学び取った事等（考察は感想ではない、レポートでは特に重要）

この方法は、教養課程廃止後 100 名定員の開講が求められ、実験室の収容定員、ならびに、学習効果や聴講時間の割り振りの制約等を勘案しながら採られた実施方法である。学生は 50 名のクラスに分けられ、隔週に実験を行い、I 期間に取り組む課題は 6 課題である。分けられた二つのクラスには、それぞれ担当教員が配置されている

II 期は医学部 1 年次、歯学部 1 年次、理学部 2 年次、農学部 2 年次学生を対象にしており、毎週 1 課題が割り振られる。従来から用いらてきた実施方法であり、事前の下調べは時間外での実験指導書による予習に依っている。実験終了時にノートでの報告が求められる（報告の形式はレポートと同様。また、このほかに 2～3 の課題について、次週までにレポートが求められる場合がある）。I 期間に学生に取り組む課題は 12 課題ほどで、聴講定員は最大で 60 名である。

実験の指導は教員と技官の 2 名が連携を取り合いながら、また、暗黙の了解の守備範囲で行っている。

実験では学生は実験指導書にしたがい、共同して前もって割り振ってある課題に自主的に取り組む。共同する学生の組み合わせと課題の割り振り日は一枚の表にして実験の初日（聴講受付日）に全日程を提示している。実験指導書の説明は、I 序論に対してのみ、実験の初日に行う実験の実施方法の説明の際に、測定値と誤差の関係に重点をおいた説明がなされるが、個々の実験種目に対しては学生の自習と予習に任されている。これは最大で 15 種目もの実験が同時に実施されて行くために、実施されている課題の説明を行う時間的な余裕が無く、また、前もって 15 の課題全部をまとめて説明しておくための時間的な余裕も無いためである。しかし、実験種目によって、要領を掴みにくいものや、

ミスしやすいものもあり、説明と注意を適宜与え、学生からの質問にはいつでも答えられる体制をとっている。こうした、実験の実施体制のもとで、実験指導書の果たす役割は非常に大きなものになっている。

2. 3. 学生の状況

先に実施された授業改善のためのアンケート（平成7年度第1学期実験科目）の集計結果を一部参照しながら学生の状況を見てみよう。対象となった授業はI期で受講生は工学部学生のみであった。受講理由は、「学部での指定」と「専門との関連で必要」が大半を占めている。また、高校で物理を履修したとする学生が9割半である。それにも関わらず、「高校での未履修等により基礎知識が不足して、わかりにくい点があった」と回答した学生が5割弱もあった。受講の成果について、「実験技術、自然観察、データ処理の方法が身についた」とするものが7割弱で、大半が積極的に評価しているが、「特に何も得られなかった」とするものも1割強いる。実験授業の性格からして当然かもしれないが、「毎回休まず出席」が9割半とかなりよい。実験時の疑問点について、「友達に聞く、担当教員に質問、関係する図書で調べる」が9割強でその内訳はクラスによる違いが大きい。残りが「特に何もしない」である。積極的に予習した学生が5割強、また、「内容をよく理解し、予備知識があったので興味深く実験できた」とする学生は4割弱で、これもクラスによる違いが大きい。大半の学生は、「実験時のノートによる結果の検討や課題ごとのレポート提出が実験の理解を深め、知識を整理するために有効」とし、「課題ごとのレポート提出が過大な負担」とするものはほとんどいない。

次に、アンケート調査によるわけではないが、I期とII期を対象にして実験終了時に受ける報告やレポートで状況を見てみると、課題を十分達成していると判断できる学生がおおよそ2割、やや難点があるが何とか達成した学生が6割、実験結果の再検討が必要な学生が2割である。これはI期の受講生とII期の受講生に共通しており、最近の傾向はこのやや難点があるが何とか達成した学生と、実験結果の再検討が必要な学生

の増加が目立つことである。これらの学生にかなり共通して見られる事例の幾つかを拾ってみる。

1. 実験指導書を読んでも理解できない。

実験指導書の測定原理に関する記述や、装置の取り扱いの込み入った説明を理解できない。こうした学生の多くは、「高校で物理を学んでいない」、あるいは、「入試で物理を選択していない」を理由にしている。

2. 基礎知識が不足している

「§13電解質溶液の電気抵抗の測定」で溶液づくりをするが、1規定の溶液の作り方を間違える（4割）。「§10回折格子による光の波長の測定」では、角度を1分単位で測定するが、この際の60進法での角度計算（加算、減算）を間違える。

「§7気体の熱膨張」では一定体積のもとでの気体の温度と圧力の関係を測定するが、実験で使われる状態変数（温度、圧力）が解らない。

3. 頭を使わない。考えない。

目盛りに付属している副尺の取り扱い、最初に全員が取り組む課題「§1長さの測定」で経験済みであるが、この経験が生かせず、応用ができない。また、「§6混合法による固体の比熱」の実験で試料の温度を測るための温度計を試料から離れた位置に装着している（4割程度）。

4. 実験指導書の測定例を参考にしない

実験指導書にある測定例には、学生が実際に使用する実験装置を使って得られた測定値が記載されていて、学生が実験を進める上で参考にできるはずのものである。「§2ボルダの振子による重力加速度の測定」や「§10回折格子による光の波長の測定」等、測定装置の性能を100%活用しなければならない実験で測定値が大幅に違っていても疑問に思わない。

5. 指導を聞き入れない。実験の手順を無視する。

実験指導書には必要に応じて実験の手順が指示してあり、手順を守るよう注意を促している。この手順は実験をミスなく効率よく進める上で重要なことだが、友達からの耳学問で勝手に無視する。たとえば、「§14電位差計」の実験で測定の操作

を理解しないうちに、手順から外れて電気炉や電気ポットの電源をいれる。その結果、測定できないままに電気炉の温度が上がり、電気炉を冷やすためにかなりの時間を浪費する。その他、測定データは測定のたびにグラフに書き込むよう指示されているが実行されない（5割）。測定データが間違いであることに気付いたとしても、抹消しないように指示しているが守られない。実験の報告がすむまで、実験装置は測定時のまま保持するように指示しているが守られない。

こうした学生の実況は以前から散見され、徐々に増加してきたことではあるが、教養課程廃止後一段と加速されている。これには、医学部と歯学部を対象にした授業では履修が今までの二年次から一年次に移され、高校で物理学を学ばず、いきなり物理学実験を履修するようになった学生が増加したことも原因していると思われる。

3. 物理学実験の改善：教材の開発と改良

実験によってある特定の物理法則を検証するには、その法則が主に働く物理現象で実験を構成しなければならない。一方、物理現象を実験から検証するには、その現象に関与している様々な物理法則と、物理的条件を勘案した測定が必要になる。すなわち、物理学実験を行うためには、物理学の総合的知識が必要であり、自然科学的考え方を身につけている必要がある。見方を変えれば、物理学実験を通して物理学の総合的知識を学び、自然科学的考え方を培うことができる。

アンケートの回答で、高校で物理学を学び、入試を物理学で受験した学生が90%あったにも関わらず、基礎知識の不足を回答した学生がおおよそ50%いたのは、この実験の持つ総合性を示唆している。また、これらの学生の大半が高校の物理学の授業で実験をほとんど経験していない（学生からの聞き取り）ことの現れである。一方、入試が多様化し、高校・大学で物理学を学んだことのない学生が物理学実験を履修するケースも生まれている。こうした学生の実況にどのように対応することができるか、今までになされてきた改善の

ための取り組みを振り返りつつ、現在検討されている改善の試み、教材の開発と改良に焦点を当ててみよう。

3. 1. 教養部での教材開発

教養部時代の物理学実験改善の取り組みの一つは、岡山大学、金沢大学、熊本大学、千葉大学、長崎大学と当新潟大学のいわゆる旧6大学の教養部物理学教室の共同研究プロジェクト「物理学一般教育改善のための教材開発」における、新しい実験種目の開発と改良の取り組みである。科学技術の発展、それも電子技術の急速な進歩に対応するために、半導体を題材とした課題「§15トランジスタの特性」を新設する等独自の取り組みもなされており、ここでは、微視的な視点を取り入れた課題の開発と、測定精度に不満があった従来の課題の見直し、装置の改良が計画された。このプロジェクトで開発された課題が「§8液体分子の結合エネルギーの測定II」と「金属の熱伝導」（非実施種目）である。また、装置の改良は課題「§2ボルダの振子による重力加速度の測定」で取り組まれた。測定精度を一桁上げることで、振子の運動に関与している種々の作用を引き出しており、現実の現象には多様な物理的要因が関与している事が確認できるように改良された。

実験技術を体得することも物理学実験の一つの構成要素である。課題として、金属の機械加工を主体とした「工作実習」と、ガラスの加工を主体にした「ガラス細工」が構想され、そのための技術実習指導書も準備された。「工作実習」の実施と物理学実験教材開発の支援のために、旋盤、フライス盤、ボール盤等の工作機械が導入されている。しかし、この課題を実施するには、その技術指導を行える技術要員の確保が難しく、今は実施課題から外されている。「ガラス細工」は技術要員を自前で確保（技官）できたこともあり、今までに何度か実施された。しかし、実施に際して、技官はかなりの時間この課題「ガラス細工」の技術指導に専念しなければならず、実験全体の指導体制を十分なものにするためには、担当の教員と技官との密接な連携が必要である。こうした事情もあり、最近では、I期に1クラス実施されるだけである。また、技術指

導を熟練した技術要員に依らずに、ビデオ教材で代換できないかと言うことで、高橋利保（理学部）、瀬野忠男（理学部、退職）によりビデオの制作が試みられたが、安全への配慮からこの実施方法は見合わせられている。

実験指導書は実験を進めてゆくための指針である。そのために、実験の手順を述べ、実際に使用する実験装置について取り扱いを説明している。学生の履修状況を勘案し、懇切丁寧な記述を心がけながら版を重ねてきた。次のような構成をとっている。

1. 目的
2. 原理
3. 装置
4. 実験（測定）：補正、注意
5. 測定例
6. 実験に取りかかる前の確認事項

これは構成の基本形であり、課題により「4. 実験」に続けて「補正」や「注意」の節が続く。「5. 測定例」は学生の履修状況を勘案して、実験に使用する装置を使ってえられた測定値と結果を記述したものであり、学生の理解を進めるために有効である。試験でいえば答えを与えたようなものだが、実験の全体を把握させるためのものでもある。また、最近になって「6. 実験に取りかかる前の確認事項」が加えられたが、これは、「1. 目的」から「5. 測定例」までの理解の点検と、実験操作上の留意点を述べたものである。次のような項目から成る。

1. 次の語句の意味を確認しなさい。
2. 次の事項を理解しているか、確認しなさい。
3. 実験に際しての注意
4. 参考

「4. 参考」は誤差の評価式が主であり、省かれる場合もある。

この実験指導書をよく読みさえすれば、実験は支障なく行えると考えているのであるが、実験につまずく学生は読みこなしていない。

3. 2. 教材の開発と改良

今まで、物理学実験改善のために、新しい課題の開発、実験装置の改良、そして、実験指導書の改訂といった方策が採られてきた。学生の状況に対応するためには、こうした方策では十分ではないかもしれない。しかし、これは実験実施のための物理的条件（実験室、実験装置、実験経費、教育スタッフ）の抜本的改善が望めない状況の中でとりうる現実的な方策であった。この状況は今も変わっていない。

物理学実験で取り上げている課題のほとんどは結果が知られている。実験結果が既知の値とよい一致を見たときの満足感は大きく、逆の場合の失望感もまた大きい。実験装置としては精度1%を目標にしており、もちろん、これを遙かに越える精度の測定もあるが、満たさない場合もある。誤差を評価することは精度の悪い測定に意味づけをしてくれるが、当然ながら精度がよければなおよい。こうした観点から、「ヤング率の測定」と「液体分子の結合エネルギーの測定II」の測定装置を改良することを考えている。

「ヤング率の測定」はサールの装置を用いている。この装置は水準器とマイクロメータが測定精度を決定づけているが、現在の装置は両者の精度が悪く、練習を積まなければ再現性のよい測定値が得られない。測定値のばらつきは誤差の評価に組み込まれるが、実験を行った学生は苦勞の割には満たされないことになる。水準器とマイクロメータの精度を上げた装置の開発を検討している。

「液体分子の結合エネルギーの測定II」では水の蒸発熱を測定している。現用の装置は誤差がおおよそ5%で、熱測定の難しさはあるにしても、もう少し精度を高めたい。測定値が必ず大きめにでることから、原因が装置と外界の断熱にあることが解っており、この対策が検討されている。

実験を興味深く行い、理解を深め、意義あるものにするには、実験の全体を理解する必要がある。実験でつまづくのは、その場その場の対応に追われ、今行っている事の意味を理解していないためでもある。実験指導書は予備知識の修得も含めて、実験全体を容易に把握できるように構成されなければならない。そして、

学生が読みこなせるように記述される必要がある。今までの改訂で、かなり改善されて来たが、注意事項等に輻輳する部分もある。次の点に配慮した見直しが必要である。

1. 実験装置や試料に関する記述は実際の実験条件と一致させ、特に装置の図は大きく解り易いものにする。
2. 実験操作の説明に、図を大幅に取り入れる。
3. 測定原理や理論の記述は、他に参考書を必要としない迄に具体的に詳細に記述する。余分な事は書かない。
4. 現象に関与する法則・条件と結果を結び、実験の全体像が見えてくるような記述を入れる。
5. 注意事項は見落とされがちなので、できるだけ本文に入れる。
6. 必要なデータを記述しておく。

これらは、すでにかなり取り入れられているが、まだ十分ではない。

また、実験の手順や注意事項を示すパネルや、装置や器具の名称を示す図面等を各実験装置ごとに用意することも、実験操作を間違えないために有効ではないかと考えている。

今回、このような、いわば実験を実施してゆく上で

のソフト面の改善をはかるために、教材編集作成用コンピュータが用意された。これらの支援を得て、多面的に教材ソフトを開発して、実験に供してゆきたいと考えている。

4. おわりに

今日の学生の状況を考えるとき、物理学実験の改善の道を「教材の開発と改良」に求めるのは本筋を外れているとの誹りを受けるかもしれない。また、実験の実施方法、課題の構成等に抜本的なメスを入れる必要に迫られているとの見方もあると思われる。物理学実験を教養教育の中にどう位置付け、実施して行くのか、今度、教養教育物理学実験の実施の主体を担うことになった理学部を核として、関係する諸学部を交えた検討が進められることを期待したい。

今回、改めて物理学実験のありかたを問い直し、今実施されている物理学実験は教養教育に位置づけられるものだと再確認している。それは物理学の方法を実体験させるための本筋をなしており、問題はどのようにその道筋を歩ませるかにかかっているからである。そして、この実体験は「科学する心」を学生に植え付けてくれると考えている。

とり急いだために、意を尽くせなかったところも多々ある。ご意見、ご叱責を賜れば幸いである。