

学生主体型の初年次物理教育「体感する科学」

千代勝実
(山形大学基盤教育院)

はじめに

本稿ではまず大学初年次における物理教育の一般論を簡単に説明した後、山形大学基盤教育院で試行している学生主体型の授業である「体感する科学」の概要を報告する。

従来型の大学物理授業としてすぐ思い浮かぶのは、講義、演習、実験の3点セットである。しかしマンパワー・費用・スペースが大幅に限られているという現状から、1年生の教養教育においてこの3点セットをそろえられるのは旧帝大を含む一部の国立

大・私立大のみで、地方国公立大や大多数の私立大学では教養物理の授業といえば対面型の講義が中心となっている。山形大学の基盤教育でもご多分に漏れず、演習と実験は一部を除き行われていない。

先進国においては国民や生徒の理科離れが喧伝されて久しい。その中でも物理の凋落は最も早く、結果その改善のための定量分析と実践（物理教育研究 Physics Education Research, PER）は特に進んでいるといえる。例えば米国では高校での物理履修率が1986年を境に改善しており（図1）、その理由と

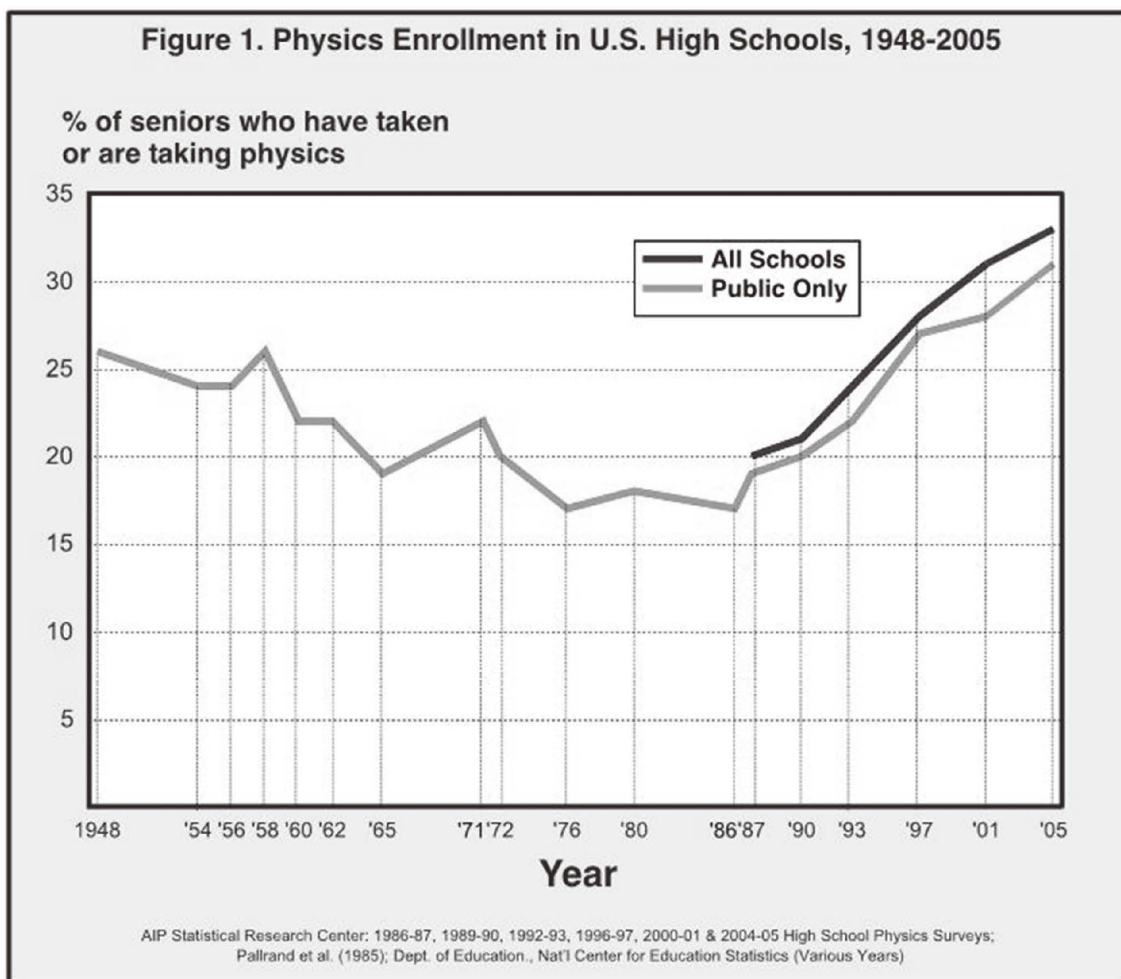


図1 米国における高校生物理履修動向の年次推移 (Reaching the Critical Mass, AIP Report, July 2008)

して学生主体型授業の導入および女子学生を含む多様な学生への対応、適切な授業評価基準の導入が挙げられている¹⁾。以後、物理における学生主体型授業に力点を置いて解説を行う。

1. 物理教育研究における学生主体型講義²⁾

多くの学問分野で長く行われてきた従来型授業は、多数の学生に対し教員1名が教壇に立ち黒板に教授事項を板書し、解説を行うというのが基本形である。教員が学生の反応を見る、質問に答えるという双方向性や、視聴覚機器、OHP・パワーポイントなどを使った表現法の改善などはあるにせよ、学生が受動的に授業に参加し、期末試験やレポートにより評価されるという構造はあまり変わっていない。昨今のPERによる研究の進展で、このような講義・講演形式の授業の場合、講義内容のせいぜい10%しか学生に伝わらないことがわかってきた。また、計算演習や試験を行ってもパターン練習として解けるようになるだけで、物理概念の理解や現実の問題への適用につながるわけではない。講義の工夫の一環として演示実験（教員がデモンストレーションとして実施する実験）を導入し理解を促進するという試みも数百年にわたって行われてきたが、これも学生の理解には全く効果がないということが明らかになっている³⁾。学生実験においてすら、料理のレシピ本のように実験指導書に書かれている手順を忠実にこなす結果を出すという、途中で学生が考える必要すらない機械的な作業に陥っている⁴⁾。

限られたリソースの中で、どのようにカリキュラムを構築し教員と学生を巻き込んでいけば、効果的な理解に到達するのだろうか。PERにおいては物理概念の理解とその整合性ある統合、現実の問題への適用が基本的な課題であると規定されている。そしてそのような能力を測定するための客観的指標、例えば力学概念調査FCI (Force Concept Inventory) や力と運動概念調査FMCE (Force and Motion Conceptual Evaluation) などの開発も同時に行われてきた。米国ではこのような客観的指標が広汎に利用され講義手法を評価するというのが一般的になっている。この事実はどのような能力向上を目的とし

なくてはならないかということについて一定の合意があることを意味している。

また、講義評価と講義手法を分離し相互に影響を与えないようにしている⁵⁾ことが現在のPERの特徴でありいかにも自然科学的である。これにより講義を実施し客観的指標による事前事後の理解度の上昇（ゲインと呼ばれる）を測定し、改良を加えるというPDCAサイクルが可能になる。さらに教育実践から教育のエッセンスを抜き出しどの教員でも採用可能な共通部分を抜き出すことができる。

これらの指標を評価することにより、学生主体型授業は従来型の授業に比べて高いゲインが得られることがわかってきた。また単に学生主体型授業を行うのではなく、適切な認知的理解を誘発するように授業を設計することが重要である。

つまり現代の物理教育においては、よいといわれている手法をあてずっぽうに行う実践は有効ではなく、評価を行うための指標をどのように設計・利用するかこそが問われている。それを踏まえた上で統合的にカリキュラムを構築しなくてはならない。

実際の講義設計においては、仮に客観的評価を直接行わないにしても概念、整合性、適用の3つの課題を意識してカリキュラム構築を行うことになる。

2. 「体感する科学」の概要

物理教育における合意事項である、概念の習得、整合性ある理解、現実への適用を山形大学で実践するための講義として、学生が主体的に学ぶことのできる新しい教養物理科目の開発をもくろんだ；

- 1) 学生が仮説を立て実験を行い結果を考察し、再度改良した実験をする

3つの課題の目的とは結局、仮説を立てて実行し検討し再度仮説を立てるといった仮説演繹法が実践できるようになるということである。つまり従来型の実験のように指導書に書いてある実験を手順通りに1回だけ実施するのではなく、例えば同じ実験を数回行い、またパラメータを少し変えて結果を比較するという系統的な実験群を計画し行えるということである。

2) 計算問題を解くことではなく概念理解に重点を置く

3つの合意には計算ができるという技術そのものは明示的に入っていない。また物理を道具として使用する場合、手作業で計算することはほとんどなく、コンピュータで計算することになる。計算が概念理解や現実への適用に直接結びつかないのであれば、体感的にどのような結果が出てくるか、コンピュータの出力する答えが体感的に正しいかどうかを知っておく方が、人生において役に立つ。計算を省いた結果、物理を専門としない学生でも受講できる科目となる。

3) 特別な設備のない講義室で実施できる

教養教育グレードの実験室はどの大学でもその稼働率が50%を超えることはなく、面積を減らされる方向にある。そこでセミナー形式として講義室で講義と実験を行う形式とした。むしろ講義室で実験できる内容と物品に設計することにより、熱心な学生なら物品の入手法を紹介することにより自宅で再現実験をすることも可能になる利点がある。

これらの目的を達成するために、基本的には4人グループで実験し、科学の方法論とグループワーク、レポートの作成までを15回の実験・講義で学ぶ授業計画を立てた。以下が平成24年度の講義内容である。

1. ガイダンスと演示実験
2. 仮説演繹法と斜面を転がる物体
3. 統計
4. 電流にはたらく力
5. レポートの書き方
6. 磁性
7. 偏光
8. ガウス加速器
9. 風船の質量
10. 実験の解説
11. 単極モーター

(複数回の実験で探求する課題も含まれる)

ここではこの講義を特徴づける初日の演示実験、斜面を転がる物体の演示実験、風船の質量実験について解説する。

3. 「体感する科学」の初日

平成24年の「体感する科学」は後期(秋学期)月曜1コマ目(1.2校時)に開講した。後期月曜朝一なのは、学生数を少なく絞ってじっくり指導するもくろみであったのだが、40人の定員に対して倍以上の学生が押し寄せるといふ予想外の結果になった。これは私の講義に人気があるというよりは、山形大学の基盤教育に実験授業がほとんどないということの反映であろう。学生達はおおよそ95%の出席率で最終日まで推移した。

「体感する科学」に限らず、私の物理の講義では必ず初日のガイダンスで直径2cmのピンポン球(2.5g)と鉄球(250g)と100倍の質量の差がある物体を2メートルの高さから落とす演示実験を行う。手順はこうである；

- (1) 最初にすべての学生に双方の球を触らせて重さの違いがかなりあることを実感させる。
- (2) 2つの質問「教科書的にはどちらが先にどのくらいの違いで落ちますか」「実際にはどちらが先にどのくらいの違いで落ちますか」を順に与えて考えさせる。
- (3) 「同じピンポン球」2つを落として「同時に落ちる」ということの基準(落下音)を与える。
- (4) ピンポン球と鉄球を同時に(複数回)落とすどちらが先に落ちたか確認させる。
- (5) なぜそういう結果になったか考えさせる。

実験はピンポン球・鉄球ともほぼ同時に落下するという結果になる。ところが、事前に学生に球の重さを体感させるとほぼ全員が、鉄球の方が速く落下するという答えを出す。これは空気抵抗の過大評価であったり重い物が速く落ちるといふ素朴概念であったり原因であるが、重要なポイントはほとんどの学生がこのような単純な実験を自分では行っていないため、身体感覚で重力の現象をつかめていないという点である。

初日のガイダンスは「当たり前と思っていること

でも自分で実験して確かめることが大事」という言葉で終わる。

4. 系統的演示実験

先に演示実験は教育効果がないと述べたが、筆者は系統的演示実験と呼ばれるパラメータを少しずつ変えて何度も行う演示実験の研究を行っている⁶⁾。仮説を立てて実験を繰り返すことにより、どのパラメータが実験データを変化させるのかということを経験的に理解させるのが目的である。また仮説自体は計算を要せず、どっちがどのくらい速いのか、程度の定性的な認識でかまわない。

この系統的演示実験は第2回に行い「体感する科学」のカリキュラム構成上重要な2つの目的を担わしている。一つは物理現象を発見的かつ経験的に理解すること、もう一つは仮説演繹法を教員が実践し、今後の講義で学生自身が行うよう誘導することである。

ここでの演示実験は、図2の斜面で図3の2つの物体を転がし、速く転がり落ちるものを繰り返し予想し、最終的に剛体の回転モーメントの理解へつなげる⁷⁾。

0. 全く同じ長さ3cm、直径3cmのアルミニウム製円柱2つ（「同時」の概念を定義する）
1. 直径3cmで長さがそれぞれ3cmと5cmのアルミニウム製円柱
2. 同じ長さ3cm、直径3cmのアルミニウム製（密度 2.6g/cm^3 ）および真鍮製（密度 8.4g/cm^3 ）の円柱
3. 長さが3cm、直径が3cmと5cmのアルミニウム製円柱
4. 直径がそれぞれ2.5cmと3.5cmの鉄球
5. 球と円柱はどちらが速く落ちるか
6. 円柱とパイプはどちらが速く落ちるか
7. パイプと糸巻きはどちらが速く落ちるか
8. 直径が同じ物体の場合、回転軸の周りに質量が集中している・していないでどうなるか

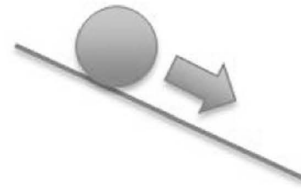


図2 斜面を転がる物体

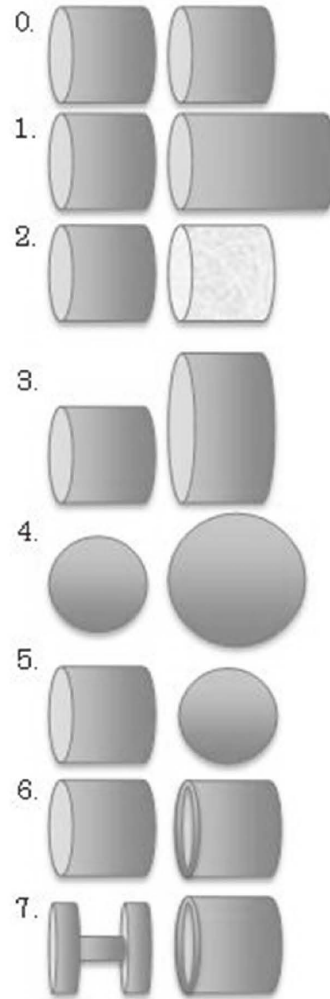


図3 系統的演示実験での各課題

答えは3択、例えば1.であれば長さ3cmの方が速く落ちる、5cmの方が速く落ちる、同時、から選ぶ。

それぞれの課題を学生に示し、どの答えになるか1分程度で考えさせる。その後実験を3回程度繰り返して結果に再現性があることを確認させる。なぜそのような結果になるのか考えさせる（平成23年度

は1人で考えコメントをつける、平成24年度は4人で議論しコメントをつける)。

それぞれの課題は経路依存的にそれ以前の課題の結果に強く依存しており、パラメータの変化つまり形状やサイズの違いと実験結果を照らし合わせると回転モーメントを直感的に理解できるように構成されている。

図4は平成23年度の正答率の結果である。2つのクラス(各45名程度で工学部中心のクラスと工学部以外の学部のクラス)で実施し同様の結果が得られている。課題1-4まではどのパラメータを変更しても結果が変わらないため正答率が90%以上に達するが、課題5で結果の傾向が大きく変わる「発見」が起きるため20%程度の学生しか正答できない。課題5-7で何が原因なのか追及していく過程を通じて、課題8で80%程度の学生が正しく回転モーメントの概念を理解できるようになる。

これ以降の講義では、複数回の同一実験を行い再現性を確認すること、パラメータを系統的に変更して実験を行うことといった実験による仮説演繹法の構成要素を学ぶよう設計されている。

5. 風船の空気込みの質量測定

最大の課題となる「風船の空気込みの質量測定」を解説する。空気中では、風船の質量は浮力を受けるため中の空気の質量はキャンセルされ、バネばかりではゴムの質量(150グラム)しか測定できない。この課題では直径1メートルの巨大風船を学生グループに渡し、これまで理解した仮説演繹法に基づいて実験を考案し、風船の質量をよりよく測定する。教員は浮力があるためバネばかりでは測定できないこと、空気込みの風船の質量の理論値(約800グラム)を計算してみせることを最初の10分で行い、学生に教員の理論計算以外の実験的手法について検討と実践を促し、個人ごとにデータを持ち帰りレポートとしてまとめる。

この課題の教育的評価は(1)風船のサイズを測定し理論値を再確認すること、(2)バネばかりで本当に量れないか再確認すること、(3)原理に基づいて考案した実験について同一実験を複数回行い、また系統的にパラメータを変えていること、(4)測定原理や手法が異なると測定の精度が大幅に異なるということを確認すること、である。実は測定精度その

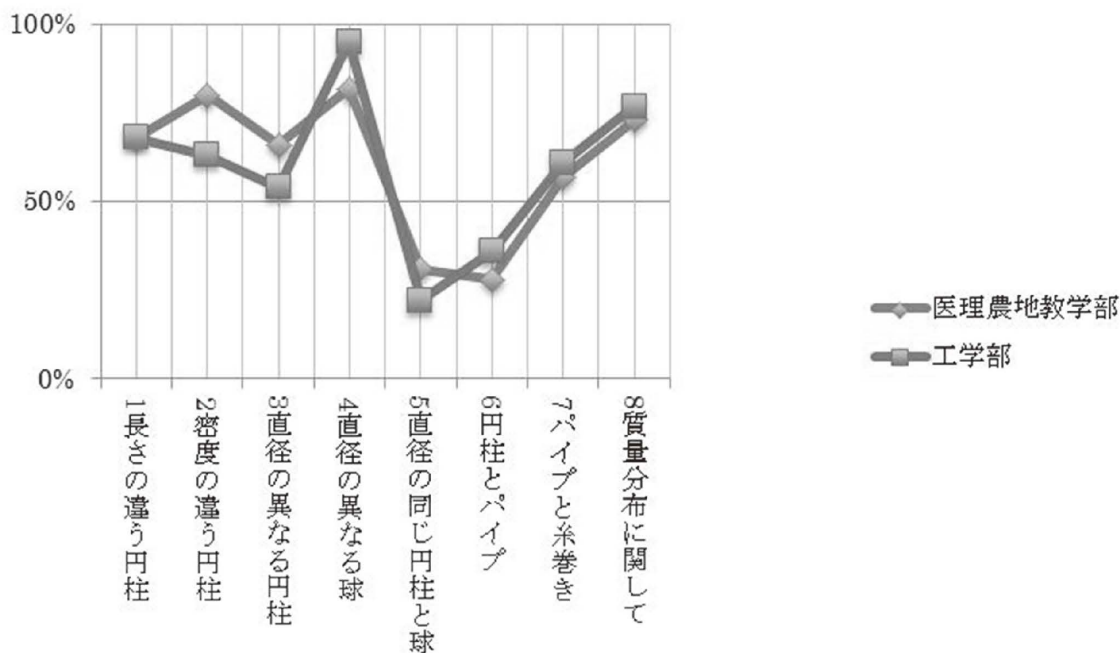


図4 系統的演示実験での正答率



図5 風船の質量測定実験での授業風景

ものは評価に入っていない。つまり所与の情報についても実際に確認すること、仮説演繹法の基本的な作法が身につけていること、そして原理的に測定できることとよりよい実験とは異なること、それぞれの重要性を理解しているかがポイントである。日常生活では扱わない巨大な風船を用いることにより体感的に空気の質量を発見するチャンスを増やすことも意図している。

学生はこれまでの講義の中で所与の情報でも再確認するということ(図5)、同じことを複数回試行するという点について執拗に強調されここまで実践しているので必ず実施することになる。また実験手法を考案する部分についてはとりあえずいろいろ試行するグループと考え始めて手が進まないグループが生じるので、後者についてはとにかく風船で遊んでみることを提案する。

レポート指導はカリキュラムの初期に作成方法と採点基準を講義し、何度かの実験でレポートを作成させている。一般に学生たちは実験レポートを作成する際に、実験のデータをまとめて結果を出すところまでは手順通りに実施することができるが、考察をどのように書けばよいか戸惑うことが多い。

「体感する科学」では実験手法とそれに起因する結果の差違についてその理由を記載するよう指導している。具体的には実験のパラメータを変えることに

よりどのように結果や精度が変わったか、また異なる原理による実験でどのように結果が異なるかその理由を書くように指導している。実験結果が理論予想と異なる場合にはむしろ考察に書くことが増えるので喜ぶようにと言うと、実験は理論に合う結果が出れば成功だという先入観がある学生たちは意外に思うようである。同時に、理論はできの悪い近似であり自分たちの出した実験結果こそが正しい現実であること、その結果に「できの悪い理論」を近づけるためにはどのような影響があったのか推測したことを考察するように強調する。これにより学生たちは「この実験は理論と合っているのでもうまくいった」などという空白を埋めるための苦し紛れの感想を書かずにすむ。

風船実験の場合、ほとんどのグループは高所からの落下、回転運動、バネによる単振動、衝突などの実験手法を試しそれをレポートにするが、数グループは自分たちの実験手法では質量測定につながらないことに気がつき、講義終了後に質問に来ることもある。この場合、自分たちの測定をまとめた上で、なぜそれが誤りだと考えるのか、またどうすればよかったのかを考察させる。

6. 客観評価に関する展望

次に「体感する科学」客観評価に関する展望を説

明する。「体感する科学」ではFCIを実施し第1回開始時と第15回終了時で学生の達成度を評価している。しかしFCIやその他の客観的指標では「体感する科学」で学習した単元を網羅することは原理的にできないためここではその評価と報告は省略する。また、レポートの作成と言った実際的な技術や、仮説演繹法の習得と実践などより高いレベルのプロジェクト計画能力は評価が難しい。そこでさしあたって受講生の成長をトレースするために専門課程に進級後の状況を各学部の教員に協力頂き評価することを検討している。

これらとともに、総合的な評価を可能にする客観指標の開発も検討している。「体感する科学」のような能動的学習の場合、伝統的な講義と比較して学生や教員の主観的な講義評価は、満足度や講義参加度を中心に高くなるのが一般的である一方、FCIなどの客観指標と相関がはっきりしないためである。

7. まとめ

山形大学基盤教育院で実施している「体感する科学」は、現代的な物理教育研究の知見をもとに、学生主体型授業の一例として、概念・整合性・適用の3つの課題を達成するための仮説演繹法の実践とそれに付随するレポート作成などの実際的な技術の習得をねらいとしている。今後は客観的な評価方法の確立が大きな課題である。

注

- 1) Reaching the Critical Mass, AIP Report, July 2008
- 2) この章の多くを「科学をどう教えるか: アメリカにおける新しい物理教育の実践」エドワード・F・レディッシュ(2003)によっている。
- 3) D.M.Majerich, J.S.Schmuckler and K.Fadigan, Compendium of Science Demonstration-Related Research from 1928 to 2008, Xlibris Corporation, United States, 2008, p.13. “Namely, students will fail to learn from an event when exposed to it only once.”
- 4) とはいえ、学生実験は講義に比べ一般に学生の満足度が高い。
- 5) FCI, FMCEともに問題内容と解答は機密であり、点数は授業成績とは全く無関係なことを学生に明言する必要がある。高得点を目標にした講義内容はもちろん、テストの解説も禁止されている。
- 6) 平成23-25年度文部科学省科学研究費補助金基盤(C)「大学講義で物理的概念の理解を促進させる系統的演示実験とリアルタイム評価の開発」
- 7) 斜面転がし実験は東京大学教養学部の物理学実験でも回転モーメントを計算してからそれを確認するという伝統的な(山大と逆の)形式で実施されている。