

動画入り物理教科書の制作

鈴木久男^{1)*}, 山田邦雅¹⁾, 前田展希¹⁾, 徳永正晴²⁾

¹⁾ 北海道大学大学院理学研究科, ²⁾ 京都産業大学

Construction of a Physics Textbook Including Movies

Hisao Suzuki,^{1)**} Kunimasa Yamada,¹⁾ Nobuki Maeda,¹⁾ Masaharu Tokunaga²⁾

¹⁾ Graduate School of Science, Hokkaido University

²⁾ Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Abstract Physics explains the movement of objects frequently. Therefore, it is effective to explain the motion by movies. Moreover, looking at movies requires less work and is more effective than reading books. We explain the concept for making physics textbooks which include movies for explanation. We also explain how to make the textbooks.

(Revised on March 22, 2006)

はじめに

学生の読解力の低下と、静止画に対する刺激の低下に伴って、本を媒体とする教育の優位性は少なくなってきた。また、学習の効率化の観点と、学生の動画認識力の増加とから、自然科学教育において動画の優位性が増してきている。ここでは、物理初等教育のために新たに開発した動画入り教科書(鈴木, 山田, 前田, 徳永, 2006)について解説する。

1. 新しい教科書作成にあたっての留意点

物理の教授法の進歩に伴い、海外の教科書の進歩には著しいものがある。一方、日本には日本独自の教育事情がある。そこで、物理の教科書作成にあたって、注意すべき点をあげておこう。

1.1 学生の質の変遷

現在、少子化とゆとり教育のために、大学入学時における学力は一般的に低下している。最も顕著であるといわれているのは読解力である。高校までの参考書は、学生が覚えやすく進化してきたために、一般的な大学の教科書は、相対的に学生にとってよりいっそう読みにくく感じるようになっていく。しかし、学生の質の変化は、悪い方ばかりとは限らない。たとえば、

*) 連絡先: 060-0810 札幌市北区北10条西8丁目 北海道大学大学院理学研究科

**) Correspondence: Graduate School of Science, Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-08-10, Japan

学生の空間的認識力は、ゲームの発達と共に非常に優れている。一方で、静止画に対しては、あまり多くの反応を示さない傾向が強い。

1.2 物理基本概念の重要性

別の報告(鈴木, 細川, 山田, 前田, 小野寺, 2006)にあるように、過半数の学生は物理の基本概念を理解せずに公式の運用の記憶と解法のテクニックの暗記によって単位を得る傾向が強い。また、通常の試験ではこうしたことは気づかれずに、教員は学生が問題を解けたことによって学生が物理を理解したと思いきむ傾向が強い。このような物理の修得は成績のためにはよいが、複雑な社会では公式が役に立たないため、大学で学んだ物理は役に立たないと思うようになる。一方、物理の基本概念の理解ができていれば、計算以前に新しい現象に対してもこういった効果が起こるか予測する能力が習得できる。そのため、物理の基本概念の理解は、公式の変形以前に重要なことである。残念ながら、通常の授業教育では、基本概念の理解が得られにくいというデータがある(Hecke, 1998)。これは、授業形態の変更によって解消されるが、教科書サイドでもこうしたことに留意する必要がある。実際にアメリカの教科書のほとんどは、数式代入以前の物理の理解に対応してきている。

1.3 専門系のための教育と非専門系の教育

物理教育にはその時間的制約により2つの方向性がある。ひとつは、物理の論理性を重視し応用には力をいれない立場であり、もう一つは、物理の論理性よりも幅広い物理現象の説明に力を入れる立場である。

これはちょうど数学において、イプシロン・デルタを用いて微積を教えるのと、微積の演算能力を重視する2つの方法があるのと同様のことがらである。この場合、数学を専門とする学生にはどちらもできることが望ましい。また、数学を道具として利用する学部学科では、演算能力を重視して欲しいと思う。しかし、数学の教員は、数学を本当に理解するには、イプシロン・デルタを用いないといけな、関数の連続性の厳密な証明が必要であるなどと思うものである。一般にこれらは、将来数学科に進む人かそれ以外の人かで分けるのが妥当である。つまり、専門のための数学と、非専門のための数学がある。

1.4 専門系にも必要な非専門系の物理理解

同様のことが物理の教員に対しても言える。物理の教員のほとんどは、物理の論理性を教えるべきだと思う。しかし、その論理性を真に理解するのは、通常物理をその後もやっていく物理学の学生のみで、通常学科に所属した後に論理性を理解することが多い。その他の学生にとっては、物理全体の描像を得ることは非常に困難であり、科学技術の基礎としての多くの現象の理解が応用上重要となる。このように、物理において工学部の一部や物理学などの専門系の物理と、応用に重点を置く非専門の物理がある。一般に日本では、非専門系であっても論理性重視の教育、アメリカでは、幅広い現象の理解を重視する非専門のための教育がなされている。ただし、物理学の学生であっても物理の狭い範囲の現象の理解しかできていない学生も多い。そのため、初等教育では専門系の物理であっても、幅広い現象の理解も同様に必要である。

1.5 多様化する学生の理解度に合わせたレベル別教育の必要性

語学の学習では、現在の語学力に応じた学習が語学力向上に役立つ。そのため、双方向性のある個別の授業が適したものとされる。学問の分野によるが、すべての人に同等のことを教えるだけの教育では、真の教育とはなりにくい。それは、すべての人には得手不得手があり、講義を受ける前の前提となる学力に差があるのは前提として認めなければならないからである。そのため、ある科目に優れた能力のある学生にはその能力をさらに伸ばす機会を与え、不得手な学生には、その理解度にあった教育をする必要がある。特に、物理では得手不得手が顕著になりやすく、各学生の理解度に合わせた教育が必要となる。このような得手不得手は、学生の能力の多様化によってさらに拍車がかかっているため、理解度に合わせた教育は物理教育にとってさらに重要な要素となる。

1.6 現代物理学の重要性の向上への対応

現在、初等物理の教育内容は50年ほど前からほとんど変化していない。一方、物理の応用分野は多種多様になってきた。そのため、幅広い物理現象の説明が求められるようになってきた。特に、アメリカでは量子論の応用へのシフトから、近年現代物理学に対する比重を大きくしている傾向がある。

1.7 専門系、非専門系の双方に必至な、キャリアに役

立つ物理現象の理解としての視点

日米の教育方針の変化以上に、元から存在する教育方針そのものに日米間に大きな違いがある。それはその教育内容である。アメリカの Introductory Course では、力学、流体力学、波動、熱の物理、光の物理、電磁気、相対性理論、量子物理学などを1年で終える。もちろんこれは、週3時間の講義と週4時間の演習、実験によって可能となっているのだが、このコースではキャリアに役立つ素養となるための物理はほぼカバーされる。このコースを終えた場合、実学的にカバーする範囲は日本の通常の大学教育を超えることになる。ただし、理学部や工学部では、大学での専門コースは日本の方が進んでいるので、専門の教育に限っては日本の方が良い面が多い。しかし、生活やキャリアに役立つ物理の修得という観点や非専門系に対する教育という観点からは、アメリカのシステムには見習うべき点が多い。実際に、空気抵抗や表面張力などといった日常に起こる物理現象の説明は、日本の専門系の学生でもとまどうことが多いのである。これは、彼らにはそれら日常的な力の理解に関する教育がなされていないからである。

1.8 日本の教育システムにあった無理のない教科書

アメリカの教科書は世界規模で競争しているため、その進化には目を見張るものがある。我々が学生のころよりもさらに教授法が進歩している。ただし、大きな欠点がある。それは、アメリカの教科書は、週7時間のコースに最適化して構成されているため、日本の大学でアメリカの教科書を使うと内容が多すぎて消化不良を起こしがちになる。そのため、日本の週1.5時間のシステムで使うためには、なんらかの効率化を行う必要がある。

2. 通常の本で、物理を理解することの困難

以下に、物理を知らない人にとって物理の本がいかに難解になるかについて考察してみよう。

2.1 物理を理解している人と理解していない人の感覚のずれ

物理は、物質の運動を説明することが多い。そのため、これを説明するには、静止画では何枚も用意し、それらを学生にイメージさせつつ説明すること

になる。また、本においては、学生は読みながらそれを想像することになる。この作業は、物理概念を理解していない学生には、理解している人が考える以上に非常に時間を要する作業である。人間は、自分が理解していると他の人も簡単に理解できるものと誤解することがよくある。このことは、物理を理解している人にはわかりにくい現象である。たとえば大学の代数幾何の本をめくってみて欲しい。代数幾何には本来イメージもあるので、大学で代数幾何を学んだ人にはなんでもないことであるが、あらたに学ぶ人にはどの本を見ても理解できそうもないものを感じるだろう。物理についても同様のことが言える。

2.2 物理理解を妨げる、誤った先入概念

物理を理解していない人は、自分の納得する仕方ですべての概念を打ち立てていることが多い。このため、本に書いてあることが自分の感覚とあまりに異なるため、書いてあることそのものが理解できないことが多い(Arons, 1997, Knight, 2004)。同様に、大学の代数幾何も同じ理由で理解不能なのである。したがって、本を読むという作業だけでは、物理を理解することは極めて困難である。

2.3 理解できないことへの学生の対応

書いてあることが自分のそれまでの考えと併せてもよく分からない場合や、なんとなく解ったような気で乗り切ろうという学生はどう対応するのだろうか？学生は、試験に合格しなければならないので、理解するというよりも記憶することに重点を置くことになる。このことには多くの学生が慣れている。それは、高校までの教育で訓練してきた成果であるからである。たとえば、理学部物理学科の学生に部分積分がなぜ行えるのか聞くと、答えられない学生が多い。理由は良くわからないが、公式として記憶し、それを運用する訓練を積んできている。2次方程式の解の公式なども同様である。また、それが大学入試には極めて有効な方法なのである。

2.4 学生の理解と教員の要求する理解の相違

書いてあることがよく解らない場合には、学生はどのような本が一番良いと思うのであろうか？実は、学生にとって「解りやすい」とは「記憶しやすい」ということであることが多い。したがって、本には、こっただけ読めばよいというような「まとめ」や注意すべき

「ポイント」がしっかり書かれている本が、「解りやすい本」ということになる。「本に書いてあることは理解できるのだけど、問題が解けなくて。。。」「などという言葉は良く聞かれるが、学生の理解と教員の要求する理解の差をよく象徴している。

以上のように、本を媒体とする教科書では物理理解には不利な点が多い。本による学習は、物理を知らない学生には非常に労力を要し、かつ本当の理解を得にくいことが多くなるのである。

3. 教科書作成の方針

これまで見たように、日本においての教科書は、世界水準のレベルを確保しつつ、しかもより少ない時間数でそれを実現するというあまりに欲張ったことになっている。これら数多くの要求を実現するために、次のような新しい教科書作成の方針を立てた。

3.1 教科書の記述は最小限に抑えて、動画による物理現象の説明を重視

教科書の記述自身は高度な説明はしない。学生は、読んで想像するのではなく、動画を見ることで物理現象の理解を効率よく行う。物理は動いている現象を説明することが多く、一般に観るという作業は読むという作業よりも楽である。また、動きのあるものに対して人間の認識力は高い。そのため、動くもので動くものの現象を説明したとき、動画の効果は遺憾なく発揮される。また、動いていない物体の説明では解説が動くので、効率よく物理を修得することができる。

3.2 高校学習指導要領の範囲内での数学の使用

大学では、ベクトル積（外積）、偏微分、ベクトル解析を用いるのが一般的である。しかし、このことが、多くの学生が物理を嫌悪する理由になっている。高校でも、内積を学習するのには多大な時間を要している。そのような学生に、新たな数学の道具の学習を強いるのは非常に困難となることが多い。また、多くは、意味が分からず、暗記に頼る結果の引き金になることが多い。また、初等教育において、これらの道具を準備することによって新たに導き出せる重要な結果と、これら数学的道具の数の比が小さい。たとえば、電磁気ではさんざんベクトル解析をやったあげ

く、電磁波の波動方程式を出して終わる。このような教育よりももっと優先すべき電磁気の理解は多くあり、また、公式の意味を忘れての公式暗記型の教育になりがちになる。すなわち、初等物理教育における新たな数学の導入は input/output ratio が悪いのである。数学をカットすることにより、その分新たな物理現象の学習の余裕ができるので、幅広い物理の学習が可能となる。また、専門系では2年次以降にも同様の事柄を学ぶ。そのため、大学初等教育では、専門系であっても、専門外の物理現象についての幅広い理解を優先する価値が高い。

3.3 レベル別例題方式

本書を多様なレベルの学生に対応させるために行った最大の特徴は、レベル別例題方式である。これを以下に説明してみよう。

3.3.1 レベル別例題

物理についての記憶を理解にまで引き上げるためには、自分で考えることが重要である。そのためには、例題演習が欠かせない。この例題演習を4段階のレベル別にした。成績のイメージと連動させるためにレベル2、レベル3、レベル4、そしてレベル5に分けられる。

まず、レベル2の問題では、物理概念理解に役立つ、数値を使わないで物理法則自身から導き出せる問題とする。

レベル3では、通常の、公式に数値を代入させたり、公式を活用させる問題である。また、数学としては高校の数学II・Bの範囲内で解けるものとした。数学の能力にはばらつきがあるため、数学への要求としては、全体的な平均としては数学II・Bまでが標準であろう。

レベル4では、物理的に少し高度な考え方が必要になるものや、数学III・Cの知識が必要となるものとした。たとえば、空気抵抗による力の強さの公式の導出や、空気抵抗のある場合の物質の運動などがこのクラスの問題となる。

このように、どのレベルの問題を解くかによって理解度が異なってくるので、基本だけをやる場合には本文とレベル2の問題だけ、また、通常のレベルの理解を目指せばレベル2とレベル3だけでよく、物理のより深い理解を要求するのならレベル4までの

問題を解けばよい。したがって、学生は自分の現在の理解度に応じた学習が可能となるのである。

3.3.2 レベル別例題による授業形態への柔軟性

レベル別学習の大きな特徴の一つは、授業形態への柔軟性である。さまざまな授業形態、授業時間、学生の理解レベルなど個別に考えなければいけない問題は、例題のレベルの選択により対応できるようになる。一つのクラスに多様なレベルの学生が混在している場合でも、試験では、レベル2、レベル3、レベル4の問題を適当な割合で配置し、最低限レベル2が解けていれば合格で、レベル4まで解けていれば優などとすれば、対応が可能となる。

3.3.3 応用可能な例題

また、通常の問題の中には、あまりに抽象的で現実離れした設定のものも多い。このような問題は、大学入試問題には多く見受けられる。この本では、現実に対して応用可能な設定のものを重点的に配置した。それは、大学初等物理が、現実に対しての応用力を重視しているからである。

3.3.4 本のカバーする物理の範囲

本のカバーする物理の範囲は、大学での教程に縛られずに、世界標準に合わせる。すなわち、力学、流体の物理、波動と音の物理、熱の物理、電磁気学、光の物理、相対性理論、量子物理学となる。日本では非常に狭い範囲を教えるが、日常生活での物理現象は非常に多く、また、物理と化学、生物などといった、人間が科学を縦に割った呼び方ではあらわしにくい領域の現象もある。そうした現象すべてをカバーすることで、応用を重視したカリキュラムにも対応できるようにした。

4. 物理教育における動画の重要性と制作過程

今まで述べたように、本という媒体だけでは物理の修得は困難である場合が多い。そこで、初等物理教育では、動画が有効な手段となる。物理は実際の運動を説明ものであるため、静止画では多大な労力を要することを述べた。そのため、動画が重要である。この動画としてどのようなものが適当なのであろう

か？

4.1 実際の実験の動画を使用することの欠点

一番良く利用されるのは、実験のビデオなどである。しかし、一般に公開するに当たっては、実験器具の著作権を考慮する必要がある。また、その有効性に疑いが向けられている。

たとえば、振り子の実験をしたとする。このビデオを見せてかかる力を説明するとしよう。すると、学生は、棒のところの汚れやさびなどを見ていたりする。つまり、何が重要かをわからないものにとっては、振り子の運動には雑多で様々な要因が同等に扱われている。これを解消する手段としては、カメラアングルを修正してより物理を際立たせる必要がある。しかし、本当の放送のプロでない限り何回も同じショットを異なるカメラアングルで撮り、修正、編集までするという作業はできないであろう。また、物理の実験は、化学などの実験などのように色が変わったり爆発したりしないため、地味である。そのため、学生にはインパクトが欠けるきらいがある。Mazur(1997)が指摘しているように、問題の答えとして組み合わせると、この欠点が軽減される。

4.2 物理そのものを浮き立たせるのに有効なコンピュータグラフィックス

実際の実験では雑多な事情が混じる困難を解決するためには、より純粋に物理を浮き出させる動画が有効となる。そのため、本ではすべての動画をコンピュータグラフィックスで作成するのが有効な手段となる。物理を際立たせるためのカメラアングルなどが簡単に修正でき、オブジェクトそのものの修正も容易である。

4.3 動画入り教科書の作成が可能となった2つの要因

CG動画の制作にあたって、動画入りの教科書の作成を容易にしたのには2つの要因がある。この要因と、制作の経過について見てゆこう。

4.3.1 コンピュータグラフィックスの作成ソフトの充実

これらの制作には、3ds max という、ゲーム制作や映画の特撮のために使用されるソフトを使用した。このソフトと、そのためのマシンの購入には、研究室

の教育経費から 70 万円を支出して制作にあたった。また、その後北海道大学で採択された、2003 年度特色ある大学教育プログラム「進化するコアカリキュラム-北海道大学での教養教育とそのシステム」から授業用動画作成支援として年間 70 万円ほどいただいて作業をしている。動画制作には、鈴木、山田、前田があたった。力学と波動の項目だけで、およそ 300 の動画が制作されたが、一つの動画にまる一日かかる作業も少なくなかった。この動画の制作に本制作のほとんどの時間が費やされている。

4.3.2 PDF の機能の拡大

動画入り教科書の制作にとって、大きな要因となったのが 2003 年に PDF ファイルに動画が埋め込まれるようになったことである。動画入りの教科書を作成する上では他に、Web 形式にするなどの選択紙がある。しかし、日本は、本の品質には大変厳しく、読者もそれになれている。Web では、文字、数式などをきれいに表示することが困難であり、品質が悪い。それに対して、PDF フォーマットは、印刷物と遜色ない e-book の制作が可能である。この PDF ファイルに動画を埋め込み、動画をクリックするだけでその動画が動き、物理を説明する設定ができる。この本の制作には、当初 Quarkexpress を使用していたが、InDesign に数式用プラグインが対応したことをきっかけに、InDesign に移植し直した。InDesign の段階で動画を配置すれば、PDF ファイルに書き出したときに、動画が埋め込まれた PDF ファイルができることになる。

5. まとめ

動画入り教科書の制作に当たっての留意点とその制作方法とを解説した。第 1 巻は、2006 年 4 月に刊行予定であり、現在、熱の物理と電磁気学、光の物理の制作に当たっている。全く新しいタイプの教科書であるためにその有効性は制作者側が提示していかなければならないという苦労がある。海外で進展著しい物理教授法の進歩に対して負けないような日本の教育に貢献できればと思っている。

参考文献

- 鈴木久男, 山田邦雅, 前田展希, 徳永正晴(2006), 「動画だからわかる物理 DVD 付 力学波動編」, 丸善株式会社
- R.R.Hake (1998), "Interactive-engagement vs traditional methods: A six-thousand student survey of mechanics test data for introductory physics courses," Am.J.Phys. 66, 64
- A.B.Arons (1997), "Teaching Introductory Physics," John Wiley & Sons
- R.D.Knight, Five Easy Lessons (2004), "Strategies for Successful Physics Teaching," Addison Wesley
- E.Mazur, Peer Instruction (1997), "A User's Manual," Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ