第 34 回 物理教育研究大会

講演予稿集

大会テーマ
「未来への種をまく物理教育」

2017 年 8 月 11 日（金）・12 日（土）

甲南大学

〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1

主催 日本物理教育学会

共催 甲南大学

後援 文部科学省，日本物理学会，応用物理学会，日本理化学協会
兵庫県教育委員会，神戸市教育委員会，
兵庫県高等学校教育研究会科学部会

第 34 回 物理教育研究大会日程

大会テーマ　未来への種をまく物理教育
日　　時　2017 年 8 月 11 日（土）～8 月 12 日（日）
会　　場　甲南大学

大会プログラム

8 月 11 日（金）

9:20 ～　開会
9:30 ～ 10:30　原著講演（A）
10:45 ～ 12:00　原著講演（B）
12:00 ～ 13:30　- 昼食・ポスターセッション -
13:30 ～ 15:00　特別講演
「AI 時代の物理教育とは？～物理学と力学のツール的性格～」
佐藤 文隆（京都大学名誉教授）
「新元素“ニホニウム”はいかにして発見されたのか」
森本幸司（理化学研究所）
15:15 ～ 16:30　原著講演（C）
16:45 ～ 18:15　原著講演（D）
18:30 ～ 20:30　懇親会

8 月 12 日（土）

9:30 ～ 10:45　原著講演（E）
11:00 ～ 12:00　原著講演（F）
12:00 ～ 13:30　- 昼食・ポスターセッション -
13:30 ～ 14:30　シンポジウム「物理教育に求められるもの」
「物理教育研究大会に物理の基礎に関して研鑽，熟察する機会を」
高橋憲明（中之島科学研究所）
「未来に種まく物理教育のあり方」
蛯名邦禎（神戸大学）
「今，物理教育が大きく変わろうとしている（？）ときに，考えたいこと」
山崎敏昭（同志社中学校・高等学校）
14:30 ～ 14:50　討論
15:00 ～ 16:15　原著講演（G）
16:25 ～ 17:40　原著講演（H）
17:40　閉会

特別講演

８月 11 日（金）　13:30～14:15　　会場 511

「AI 時代の物理教育とは？～物理学と力学のツール的性格～」

京都大学名誉教授 佐藤文隆 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

「新元素“ニホニウム”はいかにして発見されたのか」

理化学研究所 森本幸司・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５

シンポジウム

８月 12 日（土）13:30～14:50　　会場 511

物理教育に求められるもの

「物理教育研究大会に物理の基礎に関して研鑽，熟察する機会を」

中之島科学研究所　高橋憲明・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９

「未来に種まく物理教育のあり方」

神戸大学　蛯名邦禎 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11

「今，物理教育が大きく変わろうとしている（？）ときに，考えたいこと」

同志社中学校・高等学校　山崎敏昭　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13

討 論

AI 時代の物理教育とは？
～物理学と力学のツール的性格～

京都大学名誉教授, 佐藤文隆

E-mail　sato2007@gmail.com

１．教育のジレンマ：過去と未来の非対称

過去の教訓を未来に伝えるのが教育である。人類のながい歴史の中で「教育」という職業が尊敬を集めていたのはこの行いに需要があり、強く求められていたからである。「教育」が指導層養成に限られている近代以前では教授する知識の内容は「古典」にあったが、「教育」が拡大するに連れて、より「現代」的知識が求められるようになった。この「時間差」、「過去と未来の非対称」は「教育のジレンマ」の一つである。

コンピュータ時代前に高等教育までを受け、その後の ICT 革命を経験したものとしてこのジレンマの怖ろしさを強烈に感じる。教育においてはこの未来の予測を漠然とでも意識する必要があると思う。もちろん、「入門」だから変わらないとも言えるが、生活環境が激変するなかでの生徒であるから「入門」も変わらざるを得ない。

すると常識的だが、ICT 社会に浸った生徒と AI 化が進むといわれている将来が与件となる。スマホにみられる人々の受容熱から見ても、平均的にはその通りであると思う。教育一般はさておき、学校教育は平均を相手にすべきである（天才は放って置けばいい)。「AI 化」がいいとか悪いとかではなく、そういうグローバルな風が一旦は吹き荒れそうである。

２．私の体験：「計算機」革命と物理学

ICT 革命の歴史を見ると 物理学の研究がその推進役であった。原爆シミュレーション計算 、大学計算機センター 、シミュレーション映画 、CERN で HP、高エネ実験での高速回路、ビッグデータ、bitnet、光ファイバー、Phys.Rev.オンラインジャーナル、などなど、大学の中で見ても物理学者が先頭を切って情報化時代を切り拓いてきた。また 1950 年代に、DNA が物理学の実験室で発見されたように、当時の物理学は生物物理学を生み出すなど 、物理帝国主義と言われたように越境して拡大した。この「元気な物理」の歴史は、自分の体験からしても実感があった。「物理学者は未来のことに対する専門家である」(武谷三男「物理学は世界をどう変えたか」（毎日新聞社、1961 年）という言辞が輝いていた。ここでは「技術」「世界観（新宗教革命)」「共同研究」「経営・行政」まで話が及ぶ。時代の空気とからむ物理学を学ぶことのマインドに関わることであり、「郷愁」ではなく「未来のためにも、その先進性はもっと語られていいと思う。[ちなみに筆者の履歴は 1938 年山形県生まれ、1960 年京大理卒、1974 年京大教授となり 2001 年退職、2014 年まで甲南大学]

２．物理学の開放的性格

こんなことを言えば、「学問も教育も、現場は、最早、そんな時代でない！！」、後の世代の人からは年寄りの「郷愁」と受け取られそうだが、あの「元気さ」には、外的環境だけでなく、物理学の学習がもたらす特有な能力と関係しているのではないかと思う。こういう問題意識のもとで、迂遠すぎる思われるかもしれないが、関係すると私が考える幾つかのトピックスを講演では話したい。

現在のように確立した分野の情報科学は物理学とは離れた存在と思いがちだが、数理的手法では重なったものであり、物理学のツールとしても近い存在である。二十世紀後半で拡大した素粒子や宇宙のビッグサイエンスはハイテク検出器が吐き出すビッグデータの解析として AI は既に既定の存在である。もっとも、世間で話題の AI はこれを社会現象や医療に拡大することだが、これまでの歴史から類推して、理科の物化生地の中では、数学にの距離もあり、物を学んだ学生が人材供給源になると予想される。現在のように確立した分野の情報科学は物理学とは離れた存在と思いがちだが、数理的手法あるという話しをしたいと思う。

「自動車を動かすのは何か？」､「コンピュータを動かすのは何か？」への応答も自明でない。前者には電子、OS、人間があり、後者にも石油、エンジン、人間がある。例えば「電子が何であるか？」は「電子に聞け」という考え方もあるが、現実には電子は人間社会との関わりに応じて多様な何であるかの言い方がある。電子に聞いても分かるものではない。こうしたことは学問とは何か？知識とは何か？といった倫理、哲学、価値観などに関わってくる。教育はまさにそこに関わっている。

３．傍観者と参加者

物理学の歴史にみられた開放的な性格は学問自体の性格に由来する。私は「宇宙がビッグバンで始まったなどいう知識は二束三文の値打ちもない、大事なのはなぜそう考えられているかを理解することだ」といっている。理系学問の中での物理学の特性は物質が有する普遍性を実験での確証を基礎に未知に拡大することである。スグレモノの道具の所持者なのである。我々の自然という存在には存在特有の要因があり物質の普遍性だけで決まるものでないが､「普遍性の職人」として何処にも出かけていくマインドが必要である。「モノ」と「コト」､「存在」と「機能」・・・の分離が必要である。「越境」はそこから生まれる。

テクノロジーの大きな変革期に最近はあまり語られなくなったが、実証主義的な学問観である。物理学者には素朴実在論が好まれている。

ここで量子力学の解釈に関連してジョンホイラーが提起した、図１のような傍観者と参加者の議論を持ってくる。これは拙著「量子力学とは何か」（ブルーバックス）で精述した。図もそこからのものである。

素朴実在論では図２のように傍観者として自然が発信するシグナルを聞き取ろうとする姿勢になる。これに対して参加者では図２のように自然に問いかける姿勢になる。人間が自然に聞きただすのである。聞きただすからにはこちら側にある種のイメージがあってこうではないかという問いかける枠組みを持っていなければならない。

図１　傍観者と参加者

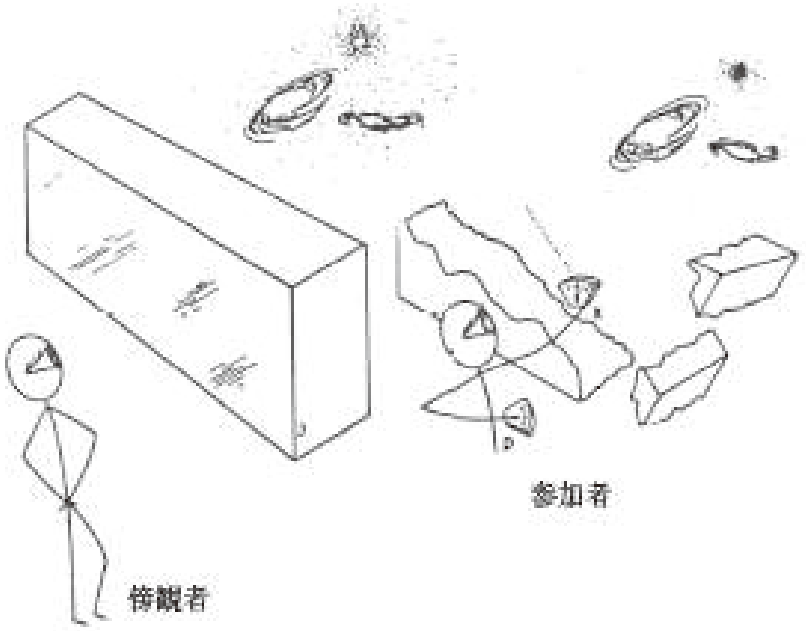


図０－２　ホイラーが描いた傍観者と参加者のイメージ
（出典：J.A.Wheeler "Beyond the Black Hole", In Some Strangeness in the Proportion, A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein, ed. by H. Woolf, ADDISON-WESLEY. 1980.）

物理学ではそれは数理的な関係である。そういう手段を自然に持ち込んで自己流で自然の把握に乗り込んでいくのである。それが実験であり、予測はあたりもハズレもあるが 、修正しながら真実に接近するのである。また、予測の枠組みは数学原理の合理性に従うもので勝手気ままなものでなく立派な道具である。

４．力学のツール的性格

物理学者には素朴実在論が好まれているが、最近はあまり語られなくなったものに、実証主義的な学問観がある。思考を飛ばすために、次のような「例題」を考えよう。

A:「ソクラテスは死ぬ」＝「ソクラテスは人間である」＋「人間は死ぬ」と分解することで個別事実記述が学問記述（「人間は死ぬ」）に変わる。注意すべきは、この飛躍で登場する「人間」という抽象概念である。個人でない「人間」など存在しないが便利な道具である。

B:電荷には最小値がありデジタル量であり、電荷密度とは人工的に作られた概念であるが、マックスウエル方程式には登場する。

C:“見える”運動は位置の時間的変動である。そこに“見えない”「力」を導入して力学という学問が成立する。

A、B、C の「人間」「密度」「力」は「便利な道具」であると言われると反発を持つ人も多いだろう。しかし「力」も量子力学にいくとなくなる。そしてこういう解釈上の対論が登場する

と、普通は「自然のことは自然に聞いてそれに従う」と人間の恣意の介入を排除する方向に逃避して深く考えない。すなわち「学問論」を避けるのが専門家集団の悪習となる。制度科学のエートスについては拙著「職業としての科学」（岩波新書）でも論じたが、「気配をよむ」。

５.「五感人間」と「文化人間」

学問に登場する概念は道具であり「スグレモノ」だけが生き残る。こういうと「実在でないのか？」と不安になる。ここで「実在とは何か？」となるが、ここでは図３のような「第三の実在」に気づくことが大事である。「第一」は外界自然、「第二」は身体自然。「第三」は人類共有の文化遺産であり、それを備えた文化人間である。これは「第一」と「第二」と同じ実在なのである。「ナマ」だけを実在と思うのはフェテシズムに脱しやすい。ここにエコ・自然愛好とサイエンスの微妙な分水嶺もあると思う。きわめて現代的課題でもある。

図３で対比した「五感人間」と「文化人間」で農業や産業革命、印刷、電信、放送、TV とならぶ ICT や AI への流れをみれば「文化人間」を推進したのはみな「人間」「密度」「力」のような概念発明が引き起こした数理で確実な知識化を進めてきた物理である。物理は「モノ」を超えた学問であるというマインドが教育では大事だと考える。

図２　認識のベクトル

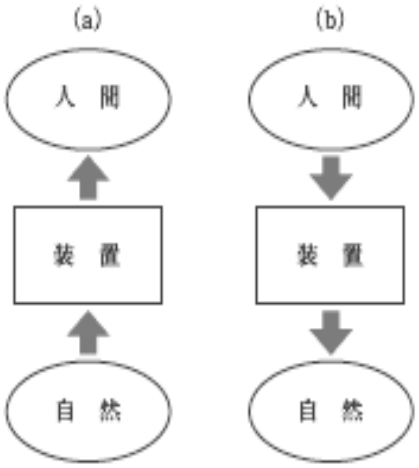


図０－３　自然と人間の関係　自然から人間に達するのか？　人間が自然にとりに行くのか？

図３　科学は「文化人間」

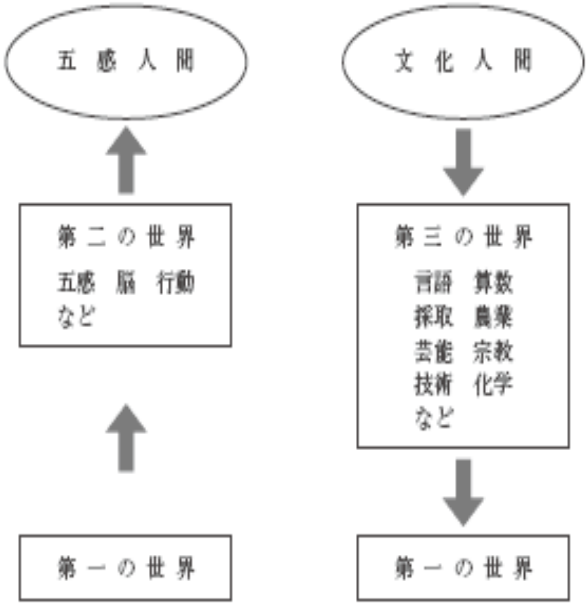


図０－５　文化人間は「第三の世界」を持っており、(ミクロ+マクロ)の自然はこの「第三の世界」を挟んで認識されているとも言える。

新元素”ニホニウム”はいかにして発見されたのか

理化学研究所 仁科加速器研究センター 超重元素研究グループ，森本 幸司
E-mail　morimoto@riken.jp

地球のみならず、この宇宙におけるすべての物質を構成しているのが元素であり、自身の持つ化学的性質をもとに元素周期表にまとめられています。その元素周期表は、実は今でも拡張され続けているという事をご存知でしょうか。一部の例外を除き自然界には 92 番元素であるウランまで存在しています。93 番元素以降の元素はすべて人工的に合成され確認されて来ました。

2015年12月、私たちの研究グループが生成し、新元素であると主張していた113番元素について、国際純正・応用化学連合（IUPAC）により発見が認定され、研究グループに命名権が与えられました。実験に参加したメンバーにより、この元素に元素名「Nihonium」、記号「Nh」と命名する事を提案し正式に認定されました。

１．元素発見の歴史

これまで、自然界はもとより人工元素による新元素の発見の歴史は、すべて欧米諸国によるものでした。今回の新元素「ニホニウム」の認定と命名は、日本発、アジア初となりました。

図１：　元素周期表(2017 年 6 月現在)

では、これまで日本では新元素の研究は行われてこなかったのでしょうか。そんな事はありません、今から約100年前の1909年の周期表には、なんとニッポニウム（Np）が記載されているのです。東京大学からロンドン大学ラムゼー研究室に留学し、鉱石の中から新元素を探す研究を行った小川正孝博士は、帰国後、当時新元素であった43番元素を発見し「ニッポニウム」と命名されました。しかし、後の研究により43番元素は自然界に存在し得ない事が判明し、残念ながら日本初の元素は幻となってしましまいました。近年の調査により、小川博士が発見したのは43番元素ではなく75番元素であった事が明らかになりました。当時75番元素（現レニウム）も新元素であったため、もし小川博士が、発見した元素は75番元素であると正しく結論されていれば、今でも周期表の75番の位置に「ニッポニウム」が燦然と輝いていた事でしょう。

また、日本で最初に加速器を完成させた理化学研究所の仁科芳雄博士は、加速器で発生させた中性子をウランに照射し93番元素を生成する実験を行いました。しかしながら、生成した元素を化学分離し同定することに当時の技術では困難をきたし、新元素発見には至りませんでした。この研究も後に検証がなされ、仁科博士の実験では確かに93番元素（現ネプツニウム）が生成されていたであろう事が確認されています。

以上のように、日本でも新元素の研究はなされていましたが、自然界（鉱物）からと加速器を用いた人工による新元素の発見、いずれも幻となってしまった歴史があります。今回正式に認定された「ニホニウム」は、まさに三度目の正直となったのです。

２．ニホニウムの合成方法

ニホニウムは､30番元素の亜鉛と83番元素のビスマスの融合反応により合成し確認されました。原子番号はその原子に含まれている陽子の数なので、原子同士を陽子を放出させることなく融合させる事が出来れば、その原子番号同士を足した原子番号の元素が誕生する事になります。

図２　ニホニウムを合成した核融合反応

しかし､それには光の速度の約10%という非常に速い速度で原子核同士を衝突させる必要があります。いかなる化学操作や加熱を行っても、このような速度で原子核同士が衝突する事はありません。そこで、重イオン加速器という装置を用いて、この衝突を強制的に起こすのです。しかし、衝突させれば簡単に融合してくれるわけではありません。融合させるためには、衝突の速度がピタリと丁度良い速度でなくてはなりません。さらに、たとえ丁度良い速度で衝突したとしても完全に融合する確率は途方もなく小さな値となります。この実験の融合確率は、約100兆回の衝突で1回融合に成功するかどうかという値と見積もっていました。つまり、この実験の成功は、いかに多くの衝突回数を稼ぐことが出来るのか、そして融合に成功した新元素をいかに効率よく検出器

で捉えることが出来るのかにかかっていました。実験は、埼玉県和光市にある理化学研究所仁科加速器研究センターで行われました。　ECRイオン源と呼ばれる装置で亜鉛のイオンを取り出し、線形加速器RILACで光速の10%に加速します。加速された亜鉛は、熱で溶けてしまう事を避けるための回転式ビスマス標的に照射されます。ビスマス標的は薄膜状で、うまく融合した新元素も融合しなかった不要な粒子もそのまま突き抜け飛び出します。それら粒子は、気体充填型反跳分離装置GARISと呼ばれる装置で113番元素を分離し、検出装置へ送り込まれます。検出装置では、やってくる粒子の飛行時間と運動エネルギーを測定し、粒子の質量数を求めます。そして本物の113番元素が来た場合、α崩壊に対する寿命が短いため、すぐさまα崩壊し原子番号が２つ小さい111番元素(レントゲニウム)へと変化します、レントゲニウムもさらにα崩壊をしてさらに軽い元素へと変わってゆきます。。検出装置では、このさらに軽い元素へと崩壊していく様子を詳細に測定し、新元素を生成した事を証明するデータとします。

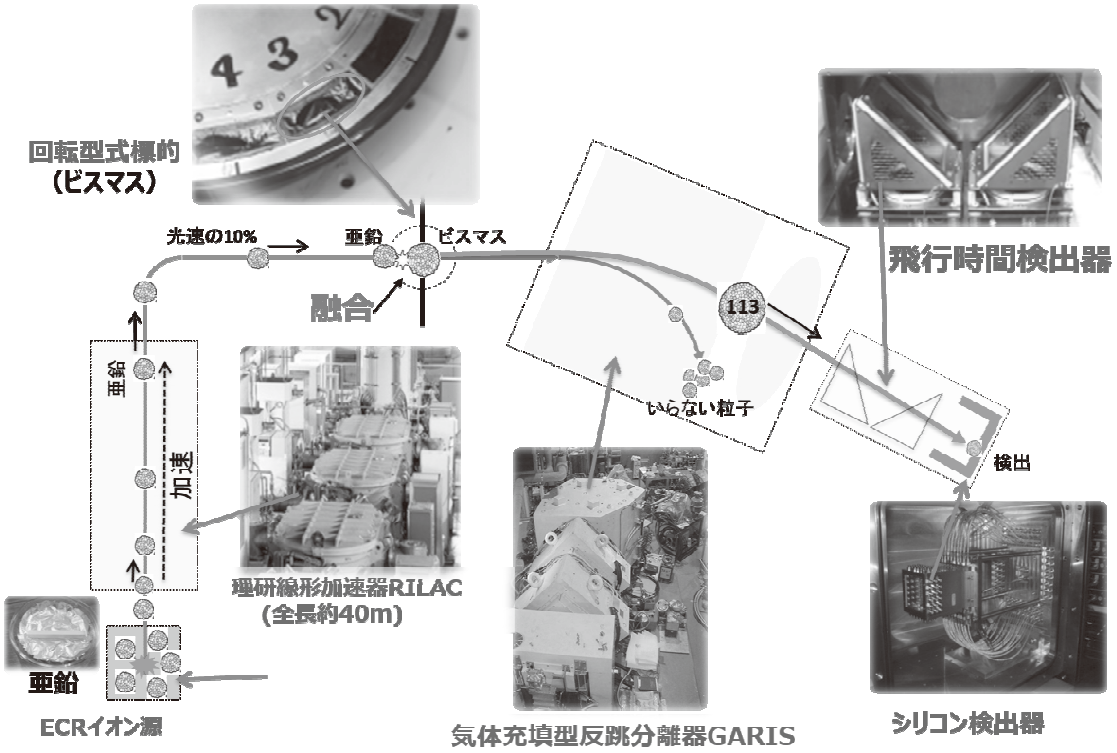


図3 ニホニウム合成実験の全容

３．観測された３例の 113 番元素

実験は2003年9月に開始され、3例の崩壊連鎖を観測して2012年10月に終了しました。最初の113番元素は、2004年7月に待ち受けている検出器にやってきました。さらに、2005年に2例目を観測しました。その後さらに、3例目の観測を目指した実験を継続し、2012年8月に6つのアルファ崩壊からなる崩壊連鎖を観測しました。これは、既知核である^{258}Lr(ローレンシウム)、^{254}Md(メンデレビウム)にまで到達し、先に観測された^{278}113を起点とする崩壊連鎖およびに^{266}Bhを起点とする崩壊連鎖とも良く一致しており、113番元素の生成を確固たる物としました。これらの研究成果により、私たちのグループが観測した元素は、113番新元素であるとIUPACとIUPAPの合同審査委員会により認定されました。

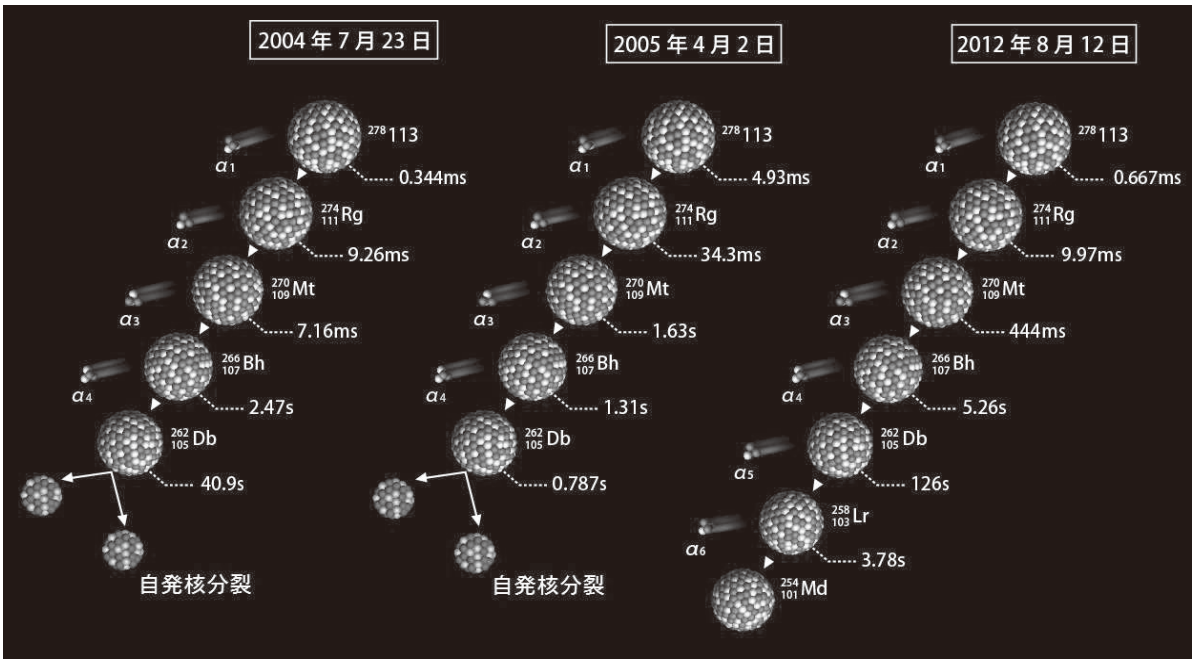


図４　観測された3例の113番元素からの崩壊連鎖

４．今後の展望

118番元素（オガネソン）まで周期表は埋まりました。現在私たちは次の119番、120番の発見を目指し準備を進めています。新しい分離装置を開発しテストもすでに完了しています。すでに、113番を超える116番元素（リバモリウム）の合成にも成功しました。早ければ今年中にも新元素（119番、120番）の探索実験を開始出来る見込みです。しかし、我々だけではなく世界中の新元素を研究しているグループも同じように準備をすすめています。119, 120番元素の熾烈な発見競争が始まろうとしています。

次に、さらに大きな原子番号の元素についてはどのような展望になっているのかご紹介します。とある理論によると、原子番号126の周辺に比較的寿命の長い、私たちは「安定の島」と呼んでいるのですが、10年、100年さらにはそれ以上長い寿命をもつ同位体が存在している領域があることが示唆されています。私たちの研究グループを含めて、世界中の超重元素を研究している研究グループは、最終的にはこの「安定の島」というところに位置する長寿命新元素をつくる事を目標に研究を進めております。

５．「ニホニウム」発見の意義

今回私たちの発見したニホニウムは、寿命が1000分の2秒と大変短く化学的性質もまだ分かっていないため、すぐに社会生活に役立つわけではありません。しかし、この発見を足がかりとし、将来、十分寿命が長い新元素が発見され、その化学的性質をも知る事が出来た時、その元素は社会生活において直接役立つ無限の可能性を示す事になります。

物理教育研究大会に物理の基礎に関して研鑽，熟察する機会を

中之島科学研究所　　高橋 憲明

E-mail　ntakahas@rcnp.osaka-u.ac.jp

日本物理教育学会では物理の教育方法が各種，研究，検討，実践され，また，そのために，物理教育研究メイルも稼働している．反面，物理学の基礎に関する知見を得，思考するための場所としての学会の役割は二次的なものとなっているように思われて仕方がない．査読のついた学会誌「物理教育」の発刊者としての学会の使命を高めるため，年一度ではあるが，物理教育研究集会のさいの一部門として，物理の基本的な考えに関して，研鑽と熟察できる機会を整備されるよう要望したい．

最近の「物理教育」誌を見ると，高校や大学で，物理を教える方法に関して色々な方策が試みられていることが分かる．物理は一番難しい教科であると言われ，場合によっては難しさのために嫌われたりするとのことである．その意味で物理の魅力を最大限に発揮し，しかも効果のある教育法を開発され，それらを受ける生徒，学生数が増加することは喜ばしい限りである．伝統的な教育方法にも．多くの長所があり，また短所もあろう．それらと比較して，これら新しい方法の実践を通して学ぶ学生・生徒たちの発展と達成度を見るのは楽しみである．

一方,物理学の指導には法則から関連の問題を解くことの他,本質の理解を目指す要素がある．物理教育に大切なことは，生徒・学生たちが習得した物理をよく噛みしめ，その本質的な意味合いに思いを馳せ,修得することである．現在それの関連論文，記事で物理の基本に関する考察を含むものは，時折少数の古参会員が投稿されるものの他は，特に若い世代の会員からの投稿は極めて少ない．

このような状況下でも，主に教える側である会員にとって必要なことのうち必須と思われることは，物理の基本の知識だけでなく，基本の意味合いにも熟知することであろう．そのために，年１回ではあるが，夏恒例の物理教育研究集会で，このような物理の基本に関して学習，研鑽する機会をあまねく会員に提供されることを願う．会員の物理の本質に関する興味と関心が広がっていけば，それに応じて，関連の論文も多く投稿され，日本物理教育学会の特徴である支部活動などを通して，意見交換の他討論に機会も増えて行くであろう．

本来，物理教育研究大会は予定が過密であるため，新しい試みを組みいれる余裕がほとんど無い状況である．この基本に関する時間配分は並列開催とし，参加者全員と言うよりも，必要とす

る会員に機会を提供する形が良いであろう，恐らく１時間程度で２題目，あるいは２時間程度で３題目，それに質疑応答と議論の時間を十分に考慮した物にしたい．これを刺激として,「物理教育」誌に色々な視点から議論する物理の基本に関する論文が投稿され，物理を議論する雰囲気が醸し出されることを希望するものである．

物理学の論文は無誤謬で有ることが大切であるが，様々な異なる接近の仕方で論理を構築することも大切である．そのさい，どちらも無誤謬であっても，見かけ上時には相矛盾するように考えられることがある.色々の接近で物事を検証し理解を深める必要があることは言うまでもない．編集委員会委員の判断に深い物理の見識が必要な理由であろう．

日本物理教育学会の会員や編集委員会委員には，幸いにしてこれらの条件を満たしている方が多くおいでになるので，物理の基本への一層幅広い接近法とそれらの特徴を見抜き，理解するための見識を生かされて,広く会員が研鑽と熟察する機会に貢献してくださることをお願いしたい．

未来に種まく物理教育のあり方

神戸大学 蛯名邦禎

「期待される人間像」は？

現代社会における「期待される人間像」[1]とはどのようなものだろうか．そのことを差し置いて，教育についての議論をすることはできなのではないか．明治時代のように「記憶力，翻訳能力を重視する」のか，あるいは，「コミュニケーション能力，発信能力，『使える』語学力」が求められているのか，さもなければ，「情報の統合力，問題の設定力，企画力，想定外に対処する即応力」が求められるのか，さらには，「意思決定の支援ツールを適切に連携させる組織力」が必要とされるのか[2]．これらはどれも，世界の中で起こっている諸問題を解決するためには必要な能力と言えるだろうが，その重点が時代とともに変わってきている．しかし，現実の問題を解決するためにも，世界の仕組みがどのようなものであるかを理解することも欠かせないだろう．そうすると，世界のどういう側面の仕組みを理解することが重要か，問われることになる．

何を学ぶべきか

世界の仕組みを理解しようとすると，注目すべき側面は，大きく三階層に分けることができるだろう．まず，人間社会がどのように動くか，それを決定しているものは何か，そのための人間社会のダイナミクスと個々人の意思決定や判断に関する知見が必要となるだろう．つまり，政治やビジネス，行政や報道や市民活動などに関する理解，そして一人一人の人間の認知や意思決定の仕組みの理解が必要になる．それには，人間が生物であるということからくる束縛条件の理解も必要になるだろうし，人間が置かれた環境についての理解も必要になる．生物としての人間を理解するには，生命現象を支配する論理を知る必要があるし，環境を理解するにも，生態系のダイナミクスやそれを構成する個々の生物の理解が必要になり，そこでも生命現象の論理を学ぶ必要がある．その環境や生命現象の理解には，それを構成している物質の成り立ちとそのダイナミクスの論理が必要になるだろう．要するに，(a) 人間界：人間と人間集団の成り立ちとダイナミクス，(b) 生物界：生命現象と生物集団の成り立ちとダイナミクス，(c) 物質界：物質の成り立ちとダイナミクス，という三階層の理解が必要になる．

なぜ物理学を学ぶのか

上の三階層のうち，広い意味の物理学は(a)（社会物理学）や(b)（生物物理学）を含むが，ここでは，狭い意味での(c)の物質に関する物理学に注目しよう．物理学の学問としての特徴は，生態学と比較するとはっきりする[3]．つまり，生態学では，よく見ればより複雑になり，偶然性や複雑な歴史的な要因を重視し，全体的傾向や法則への指向性は弱く，記述的・説明的であり，自然の戯画化を忌避するのに対して，物理学では，よく見ればより簡単になり，初期条件を重視し，普遍的なパターンや法則への指向性が強く，予言的であり，理想系（理想気体，調和振動子，等々）を重視する[4]．物理学を学ぶとすれば，ここに揚げたような物理学と特徴を十分に享受できるようにすることが必要であろう．と同時に，世界の理解には，生態学的なアプローチの有効性を無視すべきではない．

ニュートン力学

上記の物理学の特徴が典型的に現れるのは，ニュートン力学だろう．ニュートン力学を学ぶ意味は，それが簡単であるからではなく，むしろ，それが必ずしも直観的ではなく，非自明なものだからであると筆者は考えている．ニュートン力学で特筆すべき点は，それは何に関する法則であるかが述べられていない点である．「物体」に関する法則だと言えなくはないが，「物体」とは何であるか全く規定されていない．つまり，それは，世界のありとあらゆるものに関する法則だという主張だと読み取ることができる．さらに，それは，「物体」に対してだけでなく，「場」に対して（運動量やエネルギーが定義でき，その受け渡しの法則が存在するという意味で）も成り立つという見方もできる[5]．そのようなものとして受け入れるべきかどうかを，それを学ぶものとしては問い詰められていると考えるべきである．そのような自然認識に関する葛藤をニュートン力学の学習を通じて経験することは，世界全体を理解するという観点からは重要なのではないだろうか．

---

[1]下條信輔：『ブラックボックス化する現代：変容する潜在認知』（日本評論社，2017）．

[2] 同上．

[3] John Harte: *Physics Today*: 55, 10, 29 (2002), http://dx.doi.org/10.1063/1.1522164

[4] 同上．

[5] 今井功：『電磁気学を考える』（サイエンス社，1990）

今、物理教育が大きく変わろうとしている（？）ときに、考えたいこと

山崎敏昭
同志社中学校・高等学校
yamat@js.doshisha.ac.jp

１．はじめに

文部科学省の新しく改訂される学習指導要領では、「新しい時代に必要となる資質・能力の育成」のために、「主体的・対話的で深い学び」（アクティブ・ラーニング）の視点からの学習過程の改善が提唱されている。また、高大接続改革の中で大学入試も大きく変わり、新共通テストも導入されようとしている。一方で、近年高校現場では団塊の世代の大量退職に伴って、以前よりはるかに多数の若い物理教員が登場している。今、物理教育が大きく変わろうとするための外的要因がこれまでよりはるかに多いのが 2010 年代後半の状況であろう。

しかし、これらの外的要因で物理教育は本当に変わるだろうか？筆者は昨年の「物理教育」誌の特集「次世代を担う物理教員へのメッセージ」の論文[1]で、「日本の高校物理教員が極めて経験主義的な状況にある…自分が受けてきた高校での物理授業が数少ない経験としてベースになり…結果として同じスタイルでの授業が継続してしまうことになる」状況について論じた。教員から生徒への一方的に教え込む講義，大学入試のために解き方を学ぶことが中心，マニュアル通りに行って理論通りの結果を出そうとする実験，あるいはその実験さえもかなり少ない回数のみとこれまで指摘されてきた問題点はそう簡単に変わらないのではないかと。その上で、生徒のよりよい学びを目指して、物理教員の新しい授業スタイルへの取り組みも各地で始まっていることを紹介した。

ここでは，これらのこの 10 年の日本の物理教育での取り組みを振り返りながら，さらに今後改革をすすめていく上での課題や方向性などを論じたいと考えている。

２．アメリカの物理教育研究からの新しい流れを受けて

この間の物理教育の変革を考える上で大きな契機になったものは、アメリカを中心として広がってきた物理教育研究（Physics Education Research）であろう。2006 年に東京で開催された ICPE（物理教育国際会議）では、この代表的な研究者、Redish、Sokoloff らの全体講演やワークショップが行われ、認知科学の成果も取り入れて生徒の誤概念を解消するために開発された新しい教材（ピア・インストラクション、チュートリアル、RealTime 物理、相互作用型演示実験講義（ILDs））や概念的理解の調査（FCI、FMCE）などが日本の物理教員の大きな注目を集めた。この物理教育研究のガイドブックである「Teaching Physics with the Physics Suite（Redish 著)」は、各研究グループで訳されながら学び、実践検討に用いられて、2012 年日本物理教育学会監訳で「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」として日本語訳が出版され、物理教育研究の普及に大きな役割を果たしている。

これらの新しい流れが日本の物理教員に広く受け入れられるようになる素地には、FCI などの概念的理解の調査があるのではないかと考えている。物理教育研究が示す「教員が思うほど生徒は物理の概念を理解していない」ということは、長年物理教育に携わってきた教員はみなそれぞれの経験から感じていたのではないか。これらの調査から、速度と加速度を混乱する、運動している物体

には力がはたらく、電池からは常に一定の電流が流れているなどの誤概念は生徒にとって実に強固であることを示されたことで、「ああ、やっぱりそうか」と思い、改めて自分の授業を振り返る機会になったのではないかと思う。図１は筆者も参加している「物理教育の現状調査プロジェクト」[2]で 2016 年に行った日本の高校大学生の FCI 大規模調査での履修別正答数分布である。正答率 60%はニュートン力学の基本的概念を理解し始めた段階、80%はほぼ理解した段階と考えられているが、高校物理を履修し、大学に入学した学生でもこの段階に達した学生はかなり少ない。これらの詳細な分析などは今大会でも報告されている。

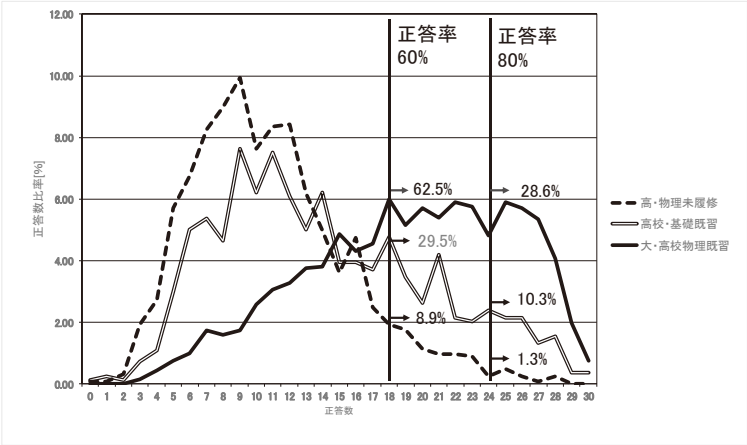


図１　FCI　2016 年プレテストでの、履修別正答数分布（被検者 5174 名：「物理教育の現状調査プロジェクト」による）

また、物理教育研究の新しい教材による取り組みは、筆者の属している京都の「アドバンシング物理研究会（ＡＰ研）」も含め、日本の各地の研究会などで実践検討されてきた。ＡＰ研においては、この間相互作用型演示実験講義（ILDs）を中心に取り組んできた。これは、生徒が（グラフを）予想し、討論し、発表も行い、教員がＩＴセンサーを用いた演示実験で行った結果をまた生徒が分析するというアクティブ・ラーニングスタイルの授業である。何校もの実践検討を通して、生徒がじっくり議論し、発言を通して意見の違いを明確に意識させるような展開で、物理の概念定着が従来の授業より向上していることも明らかになってきた。それでも課題は山積している。何より、それぞれの生徒に合ったスタイルや課題が提起できているか、クラス人数の多い日本の高校授業でどのように生徒の討論を活発に行うのか、またじっくりと生徒の討論を重ねていくには、教える内容に対して時間数が不足する問題も大きい。それでも、生徒の物理の深い概念理解をすすめていくためにこのような授業スタイルを志向していくことが求められていることは、少しずつ日本の物理教育界に浸透してきているように考えている。

３. 日本での物理教育のこれからを考える上で

最初に書いたことだが、今、物理教育を取り巻く状況が大きく変わろうとしていても、物理教員が今までの授業をどのように改善していくかという視点を持って、物理教員自身がすすめていこうとしないと結局はすすまないであろう。そしてその視点は一人ですぐに見つかるものではない。だから、「未来に種まく物理教育」をすすめるということは、いかに物理教員同士が学び合い、課題を見つけ、改善していくかにかかっているだろう。全国各地で今始まりつつある物理教育のアクティブ・ラーニングの研究会、公開講座には、若い教員が次々参加している。ｉＰａｄやスマホなどをたやすく活用し、新しい感覚で取り組んでいる姿にはわれわれも大いに学ぶところがある。そして、これまでの実践交流を生かしながら次のステップへ広げていくために、物理教育学会の果たすべき役割も大きい。このネットワークをいかに実践的なものにしていくかが、今後の物理教育の改革を推し進めていく基盤になるであろう。

[1] 山崎敏昭：物理教育　64-3（2016）　215.
[2] JSPS 科研費課題研究　26282032

原著講演プログラム

8 月 11 日(金)　　会場 511

9:30～10:30 原著講演（Ａ）　座長：増子　寛

A-1	2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅰ－全体概要とゲインの様相－	長谷川大和	･･･15
A-2	2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅱ－項目応答曲線を用いた分析－	岸澤　眞一	･･･17
A-3	2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅲ－科学的思考力の現状－	谷口　和成	･･･19
A-4	認知発達に基づくICT 環境を活用した ILDs 型高校物理授業の実践	山下　哲	･･･21

10:45～12:00 原著講演（Ｂ）　座長：足利　裕人

B-1	「電束（変位）電流は磁場を作る」実験に当たって	横田　穣一	･･･23
B-2	電磁気の物理を理解する	高橋　憲明	･･･25
B-3	高校物理でマックスウェル方程式による光速度を求める授業の実践	小室　孝志	･･･27
B-4	電球の特性について	石原　諭	･･･29
B-5	ダイポール近傍静電界分布の誤差解析	草間　裕介	･･･31

15:15～16:30 原著講演（Ｃ）　座長：岸澤　眞一

C-1	トロン温泉の教材化	足利　裕人	･･･33
C-2	「慣性力」を測定	増子　寛	･･･35
C-3	学生実験活性化を目的とした Web コンテンツ作成と教育効果	梅津　郁朗	･･･37
C-4	非弾性的な衝突におけるエネルギー損失を可視化する実験モデル	東　徹	･･･39
C-5	スマートフォンを用いた単発現象の物理実験（音速測定、電気振動）	安達　照	･･･41

16:45～18:15 原著講演（Ｄ）　座長：谷口　和成

D-1	考えさせる学生実験（自由テーマ設定型実験種目の教育効果）	松崎　清司	･･･43
D-2	ピア・インストラクション型講義の実践とグループワーク改善の取り組み	小島健太郎	･･･45
D-3	女子の物理学習を補助する PBL 式実験授業の取組みと効果	茂木　もも子	･･･47
D-4	アクティブ・ラーニング型授業と聴衆応答システムを活用した形成的評価Ⅱ	西村　塁太	･･･49
D-5	多様な学習履歴を持つ学生によるアクティブ・ラーニング	酒見　龍裕	･･･51
D-6	大学1年次力学における対話型授業	栗田　和好	･･･53

8 月 12 日(土)　　会場 511

9:30～10:45 原著講演（E）　座長：大野 栄三

E-1	Newton 力学的一般相対論統一場理論による素粒子の計算	徳田 雅彦	･･･55
E-2	磁性体モデルと学級の状態	小山 和男	･･･57
E-3	再考:ヤングの実験における単スリットの役割	勝田 仁之	･･･59
E-4	NHK E テレ 高校講座ベーシックサイエンスを通して行う理科教育	川村 康文	･･･61
E-5	日本各地の自然放射線測定の結果と分析及びGM管方式とシンチレーション方式の特性に関する考察～TEAMユリカモメプロジェクトの一環として～	壷井 宏泰	･･･63

11:00～12:00 原著講演（F）　座長：副島 優児

F-1	三態変化と分子運動についての教師の誤概念	鈴木 亨	･･･65
F-2	概念調査に関する評価法の再検討－テスト理論の立場から－	新田 英雄	･･･67
F-3	Force Concept Inventory 解答時の視線運動－統計的解析の試みとその国際比較－	大野 栄三	･･･69
F-4	熱概念に対する学生の理解の実態	五十嵐靖則	･･･71

15:00～16:15 原著講演（G）　座長：笠　潤平

G-1	「科学館大好きクラブ」14 年の成果と課題	筒井 和幸	･･･73
G-2	未履修クラスでの物理学概論(Ⅱ)	副島 雄児	･･･75
G-3	大学初年度における ILDs「ニュートンの第 3 法則」の試み	梅田 貴士	･･･77
G-4	天秤と輪軸で腰痛対策を教える－1単位看護物理学の力学教育の試み―	室谷 心	･･･79
G-5	手回し発電機の手応えと電力におけるpプリムズ	山本 修平	･･･81

16:25～17:40 原著講演（H）　座長：中田 博保

H-1	科学折り紙の手法を活用した理数科実習教材	石原 正三	･･･83
H-2	英国 A レベル物理試験問題の検討	笠 潤平	･･･85
H-3	「二大世界体系について対話」(天文対話)の英訳本において省略された図について	大室 文之	･･･87
H-4	光電効果に関して教師は何を教えるべきか	牛尾 健一	･･･89
H-5	ビー玉スターリングエンジンの運動学的考察と数理モデリング	猪本 修	･･･91

2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅰ－全体概要とゲインの様相－

東工大附高[1]，拓殖大[2]，同志社中･高[3]，京都教育大[4]，香川大[5]，新潟大[6]，東京農工大[7]
長谷川大和[1]，岸澤眞一[2]，山崎敏昭[3]，谷口和成[4]，笠潤平[5]，合田正毅[6]，村田隆紀[4]，覧具博義[7]
E-mail　hasegawa@hst.titech.ac.jp[1]

１．はじめに

我が国の高校および大学初年次の物理教育の現状を探る「物理教育の現状調査プロジェクト」は 2014 年から開始した。このプロジェクトでは，高校生および大学１年生を対象とし，物理概念理解の調査として物理教育研究（PER）に基づいて開発された「力学概念調査」（Force Concept Inventory :FCI）[1]を，科学的思考力・推論力の調査として「科学思考力調査」（Lawson's Classroom Test of Science Reasoning: LCTSR）[2]を実施した。本発表では，力学概念調査結果の全体概要とゲインの様相について報告する。

２．力学概念調査の概要

力学概念調査に参加したクラス数と人数を表１に示す。高校においては科目「物理基礎」履修時，または科目「物理」履修時に調査を行っている。大学においては，1 年次に調査を行っている。

力学概念調査は様々な分析方法があるが，我々は力学概念調査における正答総数 S が一定値（，ないしその近傍,）に属する被検者について，それぞれの項目（設問）の正答率を縦軸に，項目（設問）番号を横軸として示したパターン図（項目正答率パターン）を提案した[3]。そのパターン図を図１に示す。正答総数 S が一定値の被検者群ごとに作成した項目正答率パターンの全体は，全 30 問ごとに作成した項目応答曲線（Item Response Curves, IRC）[4]の正答選択肢についての曲線全体と等価である。

表１　力学概念調査の参加クラスと人数

校種	クラス数	人数
高校	177	5944
大学	71	4839
高校・大学計	248	10783

2014 年・2016 年のプレテストデータ

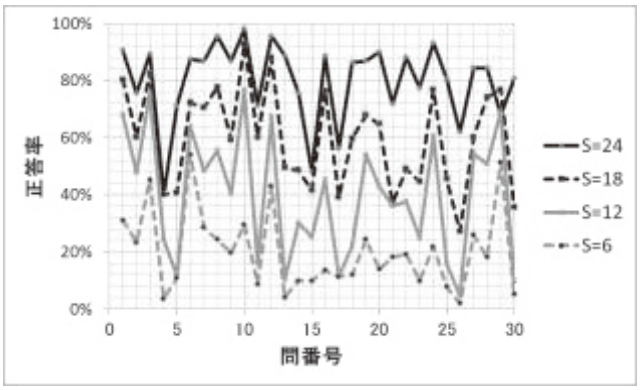


図１　項目正答率パターン(2016 プレテスト)

３．力学概念調査のゲインによる様相

コースの履修開始に先立って実施する調査（プレテスト）から，クラスの概念理解の状況や素朴概念の分布を把握し授業運営の指針を得ることに加えて，コースの履修後に同じ調査（ポストテスト）を実施する事によって授業の有効性を測り課題を把握することができる。その際に，Hake によって提案された正答率の伸長を表示する規格化ゲイン g は，有効性の指

標として有用である[5]。2016 年度では，コース開始前の調査データ（プレデータ）とコース終了後の調査データ（ポストデータ）を高校 40 クラス（1239 人），大学 29 クラス（1777 人）得ることができた。なお，高校に関しては広範かつ多様なデータを得るために，40 クラスは全て異なる高校である。図２，図３は高校・大学別，高校における科目別ゲイン分布を示す。

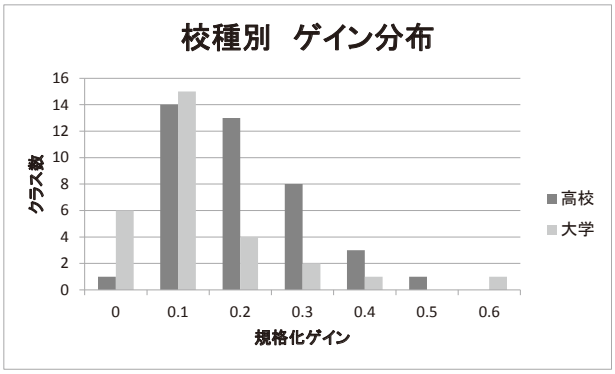


図２　校種別ゲイン分布（2016 データ）

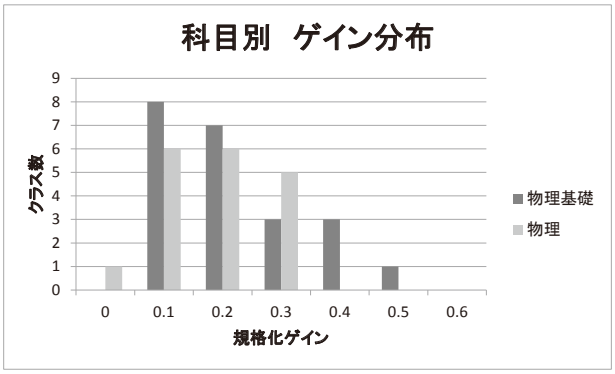


図３　高校科目別ゲイン分布（2016 データ）

図４や図５は教授法別のゲイン分布である。教授法とは，「１」が標準的な講義主体の授業，「２」がアクティブ・ラーニングなど標準的な授業方法とは異なる授業方法を導入している授業を指している。

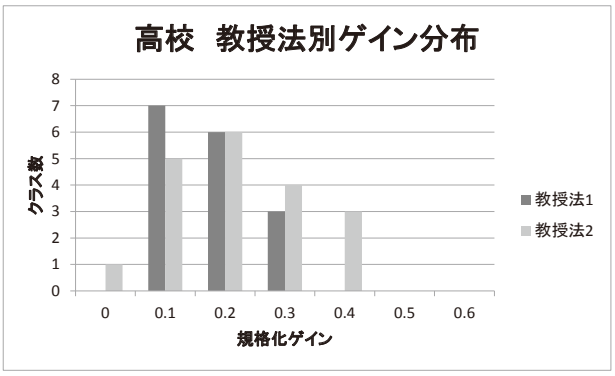


図４　高校教授法別ゲイン分布（2016データ）

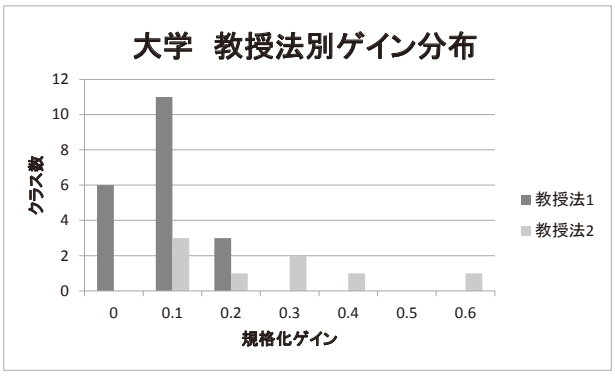


図５　大学教授法別ゲイン分布（2016データ）

本調査にご協力いただいている高校・大学の物理教員の皆様に感謝いたします。なお，本研究は JSPS 科研費 26282032 の助成を受けて実施されています。

参考文献

[1] D. Hestenes, et al. “Force Concept Inventory” The Physics Teacher, 30,141 (1992)

[2] A. E. Lawson, “The development and validation of a classroom test of formal reasoning” J. Res. Sci. Teach. 15, 11 (1978)

[3] 長谷川大和他：「「項目正答率パターン」を用いた力学概念理解度の分析」，日本物理学会第 72 回年次大会(2017)概要集 3378

[4] 岸澤眞一他：「2014-2015 物理教育の現状調査報告」，第 33 回物理教育研究大会発表予稿集 (2016), 17-18

[5] Richard R. Hake, “Interactive-engagement versus traditional methods” Am. J. Phys. 66,64 (1998)

2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅱ－項目応答曲線を用いた分析－

拓殖大[1]，東工大附高[2]，同志社中・高[3]，京都教育大[4]，香川大[5]，新潟大[6]，東京農工大[7]
岸澤眞一[1]，長谷川大和[2]，山崎敏昭[3]，谷口和成[4]，笠潤平[5]，合田正毅[6]，村田隆紀[4],覧具博義[7]
E-mail:　skishiza@ner.takushoku-u.ac.jp[1]

1. はじめに

2016 年度の研究大会では，「物理教育の現状調査プロジェクト」が 2014 年度および 2015 年度に実施した「力学概念調査」(Force Concept Inventory :FCI)[1]の調査結果について，Item Response Curve (項目応答曲線:以降 IRC と呼ぶ)[2]，および問別正答率パターンを用いて分析した結果を発表した[3]。その後，2016 年には 2014 年と同程度の 5 千人規模の大規模調査が行われたので，2014 年のプレテストと 2016 年のプレテストとを合わせた 10,783 人のデータを基に IRC を作成した。今回の講演では，この IRC をインペタス誤概念の観点から分析した結果について報告する。

2. IRC について

IRC は, FCI 全体の正答総数(以降 S 値と呼ぶ)の集団ごとに，5 つの選択肢を選んだ人数の比率をグラフとして表現する。図 1 は問 11 の IRC であり，例えば枠で囲った S 値 10 の集団に注目すると，選択肢 3，2，4 を選んだ者がそれぞれ 49%，22%，18%であり，選択肢 1 と 5 はほとんど選択されなかったことが示されている。

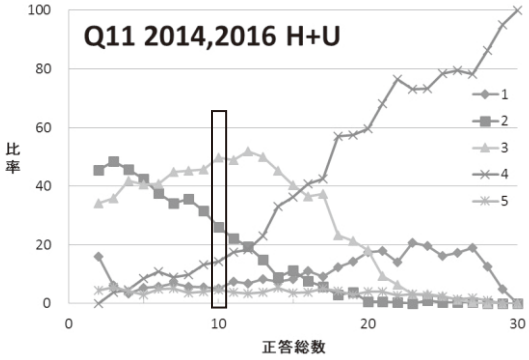


図 1　問 11 の IRC

昨年度の発表では, 2014 年度のデータから作成した IRC が，文献[2]に掲載されているアメリカの IRC と驚くほど似ていることを示した。今回は我々が調査したデータについて，2014 年度と 2016 年度，高校と大学，物理の履修と未履，等に分けて IRC を作成してみたところ，いずれもほぼ同じ形であることがわかった。このことから，ニュートン力学の習得過程には，学習者の集団によらない普遍性があることが推測できる。

3. インペタス誤概念を軸にした IRC 分析

FCI には 1 つの問に複数の誤概念が含まれており，さらに 1 つの選択肢に複数の誤概念が含まれることもある。これらの誤概念は，文献[1]に一覧表としてまとめられている。ここではインペタス誤概念に関わる複数の問の IRC について検討する。インペタスとは，「運動している物体には，物体を動かし続けるはたらきを持った『力』が備わっている，または『力』がある」という考え方であり，慣性の法則とは対立する概念である。物体が動くためにはインペタスが供給されなければならず，またインペタスは状況に応じて増えたり減ったりすると考えられている。

図 1 で示された問 11 は，摩擦のない水平面をすべっているパックが，進行方向と垂直方向に打たれた後，パックにはたらいている力を問う問題である。代表的な誤答は「1：重力による下向きの力」，「2：重力による下向きの力と進行方向の水平な力」，「3：重力による下向きの力と，床から受ける上向きの力と，進行方向の水平な力」であり，このうちインペタス誤概念を含む選択肢は 2 と 3 である。

そこで, この2つを合算したグラフを作成した(図2)。このグラフは，インペタス誤概念は，初学者ではかなり強固であるが, S 値 20 以上の集団ではほとんど克服されているらしいことを表している。

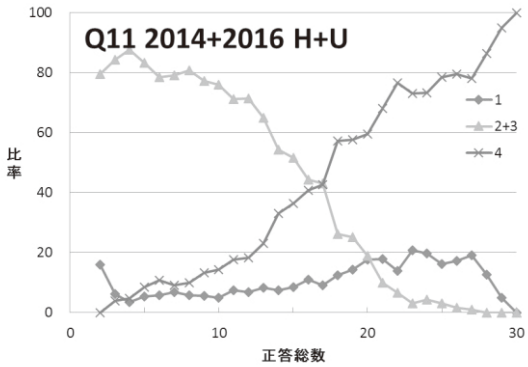


図 2　問 11 の 2 と 3 を合算したグラフ

次に，真上に投げ上げた鉄球にはたらく力を問う問 13 の IRC を図 3 に示す。この問の主な誤答は「1：重力＋減少し続ける上向きの力」,「2 : 最高点までは減少し続ける上向きの力，下降中は徐々に増加し続ける重力」,「3 : 最高点までは一定の重力＋減少し続ける上向きの力，下降中は一定の重力」である。これらの誤答はいずれも下線を施したインペタス誤概念（散逸するインペタス）を含んでいるので，これら 3 つの選択肢を合算したグラフを作成した（図 4)。このグラフから，インペタス誤概念は S 値 10 あたりから徐々に減少していくものの，S 値 20 の集団でもまだ 4 割に保持されていることが読み取れる。

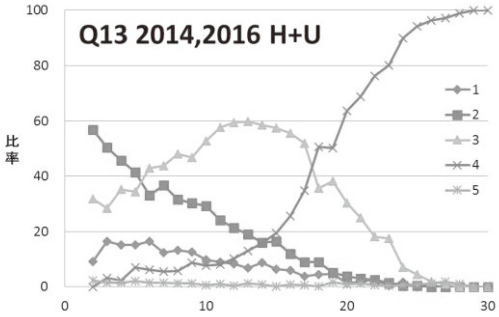


図 3　問 13 の IRC

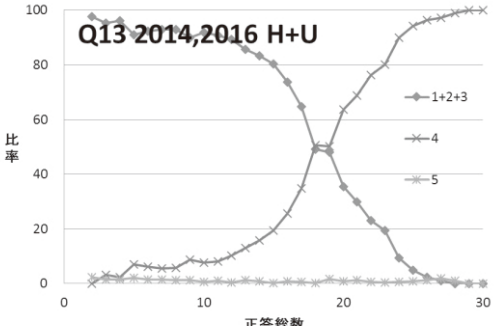


図 4　問 13 の 1,2,3 を合算

さらに同様な手法で，問 30（強風下で打たれたテニスボールにはたらいている力）や問 5（水平面上にある円形の通路を運動している球にはたらいている力）について分析を試みた。すると，問 30 では「打たれた力」，問 5 では「進行方向の力」というインペタス誤概念を，S 値 20 の集団でも約半数が保持していることがわかった。

このように，誤概念は文脈によってその現れ方が異なっているため，誤概念を一度で克服することはきわめて難しいと考えられる。ニュートン力学の習得のためには，様々な状況設定のもとで，生徒・学生に繰り返し考えさせる場面を設ける必要があるのではないだろうか。

本調査にご協力いただいている高校・大学の物理教員の皆様に感謝申し上げる。
この研究は JSPS 科研費 26282032 の助成を受けて行われている。

参考文献

[1] D. Hestenes, et al. “Force Concept Inventory” The Physics Teacher, 30,141-158 1992

[2] G. A. Morris, et al. “An item response curves analysis of the Force Concept Inventory” Am. J. Phys. 80(9) , 825-831 September 2013

[3] 岸澤眞一，長谷川大和，山崎敏昭，覧具博義他：「2014-2015 物理教育の現状調査報告」，第 33 回物理教育研究大会発表予稿集(2016), 17-18

2014-2016 物理教育の現状調査報告Ⅲ－科学的思考力の現状－

京都教育大 [1]，香川大 [2]，拓殖大 [3]，同志社中高 [4]，東工大附高 [5]，新潟大 [6]，東京農工大 [7]，
谷口和成 [1]，笠潤平 [2]，岸澤眞一 [3]，山崎敏昭 [4]，長谷川大和 [5]，合田正毅 [6]，村田隆紀 [1]，覧具博義 [7]
E-mail: guchi@kyokyo-u.ac.jp[1]

1. はじめに

初等・中等教育における理数系教育の重要な目標のひとつに，批判的思考や推論等を含む一般的な科学思考力・推論力の育成がある。とりわけ物理教育は，科学的推論力の涵養に有効であると期待されている。しかし，この期待がどの程度達成されているかについては必ずしも明確に確認されていない。

これに関して，米国物理教育研究（PER）では，「Classroom Test of Science Reasoning: CTSR [1]」を用いて被験者の科学的推論力（認知的発達段階）を評価し，その結果と物理教育との関係性について分析したいくつかの興味深い研究がある。たとえば，Coletta ら[2]が力学を受講した大学生の FCI ゲインと認知的発達段階との間に正の相関を見出している一方で，Bao ら[3]は，中国と米国の大学新入生の科学的推論力の分布はほぼ同じであるが，FCI の結果は大きく異なることを報告している。このように一見すると矛盾しているような結果は，物理教育の改革における視点として，概念的，知識的理解など「結果」を評価するだけでなく，その理解を支える科学的推論力や認知的発達など「学習者の背景」や学習内容や授業手法などの「学習過程」を含む，多面的な評価を量的，総合的に行うことが重要であることを示唆している。

そこで，2014 年度より実施している「物理教育の現状調査プロジェクト[4]」では，FCI による力学概念調査とともに，認知的な発達段階を評価する上記の CTSR を実施し，あわせて被験者の性別，物理の履修状況，物理に対する好嫌と得意不得意，さらに受講している授業の形態（講義型 / AL 型等）に関するアンケート調査を行い，両調査の結果の相関性や，それに影響する可能性のある様々な要因との関係について検討している。本稿では，2016 年のプレテスト調査結果を中心に，研究の進捗状況を報告する。

2. 科学的推論力調査（CTSR）と認知段階

CTSR は，Lawson によって開発された，ピアジェの認知発達の考えに基づく，認知的操作段階を調査する質問紙調査である（本研究では多肢選択版を使用した）[1]。具体的操作から形式的操作に必要な「推論パターン」に着目した課題に対する解答とその理由を選ぶ 12 の設問群で構成される（図１）。

採点は解答と理由を各１点（24 点法）とし，被験者は正答数（L 得点）の低い順に「具体的操作期（L=0-10）」「前期移行期（L=11-15）」「後期移行期（L=16-20）」「形式的操作期（L=21-24）」の４つの段階に分けられる。具体的および形式的操作期の特徴を表１に示す。

設問番号	トピック	評価される推論パターン
1，2	粘土の変形	重さの保存
3，4	ガラス玉と鋼球	押しのけられる体積の保存
5，6	水の移し替え1	比例的思考
7，8	水の移し替え2	より高度な比例的思考
9，10	ふりこの周期	変数の同定と制御
11，12	重力と光に対するハエの反応1および2	変数の同定と制御および確率的思考
13，14		
15，16	袋から札の取り出し1	確率的思考
17，18	袋から札の取り出し2	より高度な確率的思考
19，20	ネズミの大きさと色（比率および確率を含む）	相関的な思考
21，22	ろうそくの火	仮説-演繹的思考
23，24	赤血球のモデル実験	仮説-演繹的思考

図１　CTSR テストの概要

表１　代表的な認知段階の概要

認知段階	特徴	可能な操作・概念の例
具体的操作期	具体的な事物や現象，または経験がある場合に限り，論理的な思考が可能	思考の可逆性 保存概念
形式的操作期	具体的な内容にとらわれず，形式的な論理に従って抽象的な思考が可能	仮説演繹的操作（命題論理） 組み合わせ思考 計量的比例概念

3. 科学的推論能力の状況

2016 年度の調査（プレテスト）は，大学生 1328 名，高校生 1399 名の計 2727 名を対象に実施した。CTSR の正答数（L 得点）の度数分布は，大学生，高校生に関係なく，L=19～20 付近をピークとし低得点側にな

だらかな裾を持つ分布をとる（図 2）。この形状は Bao ら[3]の結果（図 2 中，左上図）と著しく類似している（特に米国に近い）ことは興味深い。

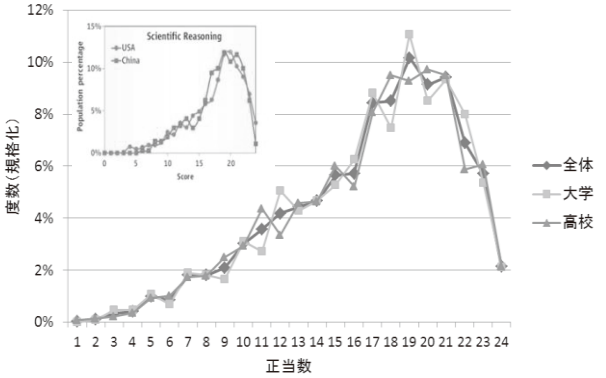


図 2　CTSR の正当数分布（校種別）。左上図は米国，中国の同分布[3]。

次に，L 得点に基づいて認知段階を評価したところ，その内訳（図 3）が示すように，形式的操作期にある被験者は全体の 25%程度であり，さらに高校生と大学生の各発達段階の割合がほぼ同じであった。物理学習，特に概念的理解の過程では，形式的操作（表 1）を必要とすることを踏まえると，この結果は日常の物理授業において，より具体的で丁寧な展開・配慮が必要であることを示唆している。

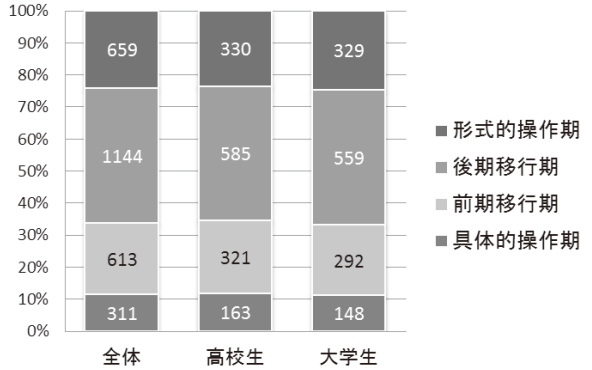


図 3　各発達段階の割合（校種別）

4. 認知的発達と力学概念

FCI（5258 名）と CTSR（2727 名）を共に受検した生徒・学生（2255 名）について，L 得点に基づく認知的発達段階と FCI の得点（以下 F 得点）との関係について分析した。図 4 に，FCI の正答数ごとの被験者数の度数分布を発達段階別に示す。図より，具体的操作期のほとんど全ての被験者が F 得点 17（正答率 60%）以下であり，前期移行期，後期移行期，形式的操作期と段階が上がるにつれて，ピークの位置が高得点側にシフトしながら分布が広がり，正答率 60%以上の割合が増加していることがわかる。

一方で，形式的操作期にある被験者グループでも，F 得点が 17（60%）以下の者が一定の割合で存在することもわかる。実際，形式的操作期の被験者において，F 得点率が 60%以上の割合は 6 割弱に留まり，80%以上になると 3 割しかいない。これらの被験者の場合，認知発達の上では充分にニュートン力学の基本概念を理解できる段階にありながら，適切な学習が行われていない可能性を示唆している。

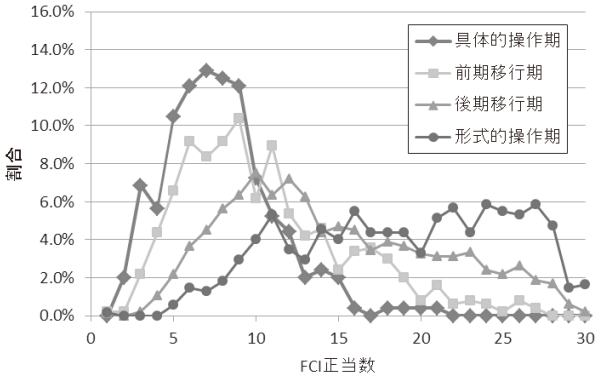


図 4　発達段階ごとの FCI 正答率の分布

5. おわりに

日本の物理教育の現状を把握し，改善を目指すプロジェクトの一環として，FCI による調査結果を CTSR 調査結果に基づく認知的発達の視点から分析した。その結果，現在の物理教育のあり方を再検討する必要性を強く示唆する結果を得た。今後は，より多面的な分析を行い，その結果に基づき，力学概念の改善に向けた具体的な提案を含めた，教育現場への支援のあり方について検討していく必要がある。

本調査にご協力いただいている高校・大学の物理教員の皆様に感謝いたします。この研究は JSPS 科研費 26282032 の助成を受けて行われている。

参考文献

[1] A. E. Lawson, J. Res. Sci. Teach. 15(1), 11-24 (1978). 多肢選択版 (2000).

[2] V. P. Coletta & J. A. Phillips, Am. J. Phys. 73, 1172 (2005).

[3] Lei Bao *et al.*, Science, 323 (2009).

[4] 岸澤眞一，覧具博義，他，第 33 回物理教育研究大会発表予稿集, 17-18 (2016).

認知発達に基づく ICT 環境を活用した ILDs 型高校物理授業の実践

京都市立京都工学院高校 [1]，京都教育大学 [2]　　山下 哲 [1]，谷口 和成 [2]
E-mail:　haz34840@wood.odn.ne.jp[1], guchi@kyokyo-u.ac.jp[2]

１．はじめに

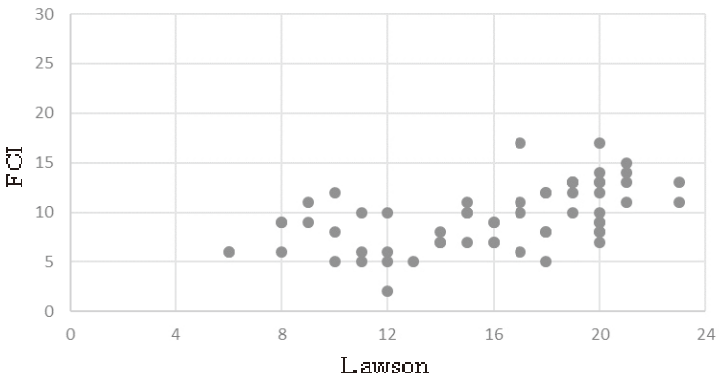
最近の物理教育研究において，従来型の「教師から生徒への教え込み型」の授業形態が，生徒の物理の理解を全くといって良いほど改善していないことが明らかとなってきている。生徒は物理を学習する以前から，長い期間をかけて日常経験等から会得した不完全で不正確ではあるが，直感に沿う素朴概念（誤概念）を保持していることが非常に多く，教え込み型の授業形態では素朴概念が解消されにくいことが原因と考えられている。この素朴概念を解消する手段の一つとして，Interactive Lecture Demonstrations (ILDs)があり，その効果が大学のみでなく，中等教育においても一定の効果が報告されているが,本研究においては ILDs を用いて素朴概念の解消をはかっている。

一方で，高等学校における物理の学習のハードルは素朴概念の解消のみではなく，物理的な概念を整合性を持って組み立てることを苦手とする生徒も多い。この点，複数の概念の整合性を持った構築に関しては，素朴概念の解消を目的とした授業以外においても生徒の能動的参加が不可欠であると考えられ，様々なアクティブラーニング型の授業が試みられている。その一つの形態として，講演者らは，英国で小・中学生の認知的加速と論理的思考力の伸長を目的に開発された Cognitive Acceleration through Science Education (CASE)[1]の指導原理を，講義型授業においても実践した「CASE 的なはたらきかけ」を行ってきたが,認知的な発達段階の加速のみでなく，生徒の学習意欲の向上と学習姿勢の改善，特に，科学的推論能力の向上に効果が確認されている[2]。そこで本研究では，この「CASE 的なはたらきかけ」を生徒の物理概念の構築を支援する目的で用いている。

２．生徒の現状と本研究の目的

講演者の勤務校は STEM 教育を掲げ,科学技術を実社会に還元できる素地を作ることを教育目標の一つに設定しており，生徒の多くは科学技術に対して,漠然としてはいるものの，自らの進路選択の一つの選択肢として考えている。こういった背景のもと,「物理基礎」の学習を始める前の生徒の現状を知るために，2017 年 4 月に,勤務校の高校 2 年生に対して，力学分野の概念調査として FCI を，認知的発達段階の調査として Lawson test を，学習姿勢の調査として MPEX を実施した[3][4]。図 1 は FCI と Lawson test の相関を示したものであるが，素朴概念を保持している割合が非常に高く，同時に，認知的な発達段階が形式的操作期に達していない生徒が多数存在することが分かる。認知的な発達段階と物理の理解の間には一定の相関が認め

図1　FCI－Lawson　相関



られることが知られており[4],物理の学習を進めていくにあたって，素朴概念の解消とともに，認知的な発達段階を考慮した授業展開を通して物理概念の構築を支援することが求められると言え，これらの方法を開発していくことが本研究の目的である。

３．ICT 環境を利用した，ILDs と「CASE 的はたらきかけ」

講演者は，運動学と運動の法則の範囲について，ILDs を 2017 年度 4 月より，高校 2 年生に対して,「物理基礎」（2 単位）の授業の中で実施してきた。講演者の勤務校は生徒全員にタブレット PC を購入させており，ILDs においても積極的に活用している。すなわち，ILDs の予想シートと結果シートの配布と集約はタブレット PC を通じて行い,集約した結果をリアルタイムでクラス全員に紹介することで,意見の多様性と議論を通じた自他の変容を実感できる様に進行している。加えて，ARCS モデルに基づいた 5 段階の自己評価用紙を ILDs の授業後に配布し，これを提出させたものに著者がコメントをつけて返却することで，自己の思考過程を振り返ることの重要性を強調し，生徒の思考に対する動機づけを支援している。

「CASE 的なはたらきかけ」とは，CASE の指導原理である具体的準備・社会的構成・認知的葛藤・ブリッジング・メタ認知を通常の授業においても実践するものであるが，ILDs を実施しているクラスにおいて「CASE 的なはたらきかけ」を行っている。「CASE 的なはたらきかけ」は適切な課題や発問により，生徒の思考過程を外化・共有することによって，相互にこれを検証する形態を取る。タブレット PC はこの方法論に親和的で，上述の通り，教員が集約した結果を生徒に提示することが可能であり，授業内で扱った概念および概念の構築に対する生徒の解釈や理解を容易にクラス全員で検証することができるため，積極的に用いている。上述した様に，物理の学習において，複数概念間の関係性の理解，すなわち，概念の構築は大きな課題の一つであると考えられるが，通常であれば個人の中で完結してしまう思考過程に対して，外化して検証する場面を意図的に設定することによって，概念の構築に必要不可欠である論理的思考力の育成をはかっている。

４．評価方法と謝辞

ILDs の評価は ARCS モデルに基づいて行うことは前述した通りであるが，本研究全体の効果を FCI,Lawson test,MPEX の推移と，生徒への個別インタビューをもって検証する予定である。

本研究は，JSPS 科研費基盤研究（C）研究課題「認知科学的アプローチにより問題解決能力を育む高校物理カリキュラムの開発」（15K00975）と武田科学振興財団の助成を受けて行っている。

参　考　文　献

[1] P. Adey, M. Shayer, C. Yates, “Thinking Science”, 2001.

[2] 山下哲，谷口和成，” 高校物理における‘認知促進’プログラムと認知過程を重視した授業展開の可能性”，日本物理学会第 72 回年次大会講演概要集，20pC11-5(2017).

[3] 谷口和成，他，日本物理学会講演概要集 64(1-2), 406(2009)，同 69(1-2), 457(2014)，等.

[4] 谷口和成，笠潤平，村田隆紀，覧具博義，“日本の高校・大学生の科学的思考力の現状”，日本物理学会第 72 回年次大会講演概要集，19pC11-6(2017).

「電束（変位）電流は磁場を作る」実験に当たって

横田　穣一
j-yokota@yb3.so-net.ne.jp

1 「電束（変位）電流は磁場を作らない」と物理法則の検証

ここでは古典物理学の範囲で現象論的に考える．さらに高等学校や高等学校―中学校一貫校を対象として考える．

1.1 物理法則の検証

海外の電束電流研究の現状について，ロシュの総合報告[2]がある．これによると、1880 年頃にすでに電束電流は磁場を作らないとする報告がなされている．上記特集記事や海外の論文では，ほとんどが電束電流は磁場を作らないかあるいは作っても僅かであるというものである．

なぜ電束電流は磁場を作らないとする考え方が出てくるのかについて考えてみる．

通常，法則は自然の観察や実験の結果から導かれる．しかし電束電流については，よく知られているように，定常電流の作る磁場に対して非定常電流の磁場を表す法則として，マクスウェルがアンペールの法則を理論的に拡張した．この過程において特徴的なことは．観察・実験の手続きがとられていないことである．

アンペール・マクスウェルの法則による電束電流が磁場を作るか否かの実験で、当時の研究者たちの得た結果の殆どは電束電流による磁場は認められなかったようである．いいかえると，電束電流が磁場を作るか否かを見極めるための実験において基礎になっている現象を，正しく把握し認識していないことに起因しているのではないかと思われる．またマクスウェルの時代では，交流を扱う測定器などは今日のように発達していなかったので，不備な実験の下で考察したので誤った理解のまま推移したと思われる．

アンペール・マクスウェルの法則の実験的検証もさることながら，一般に，法則を実験的に検証しようとするとき，その結果に満足できないときは，検証しようとする法則そのものを疑い，他方で満足のいかない結果を正当化するような理論を作り上げ，それをよりどころにして自説を主張する．そのとき多くの場合にはモデルを立てて，それに基づいて論理的に矛盾のないような論理を展開して説得しようとする．そのモデルはしばしば非現実的な性格を有するものが多い．自然を反映しない理論は、実験の精度が上がり，また実験の質が良くなることにより淘汰され，人類の物理的自然認識が進化して学問としての物理学が発展することになる．

電束電流は磁場を作らないとするこの立場はアンペール・マクスウェルの法則の検証実験において，十分な検証結果が得られないまま，すなわち誤った実験結果に基づいてその解釈を行った結果と推測される．

1.2 電束電流検証実験の問題点

ここに挙げた実験は拙論文[1]で既に本誌に掲載されたものであり，ホワイトヘッドの実験を踏襲するもので，その時の経験を基にして指摘した問題点を修正すれば，実験は必ず成功する．

① 電束電流による磁場の検出に鉄芯入りのトロイダルコイルを用いるが，鉄芯の寄与の評価がむつかしいので，代わりに中空のトロイダルコイルを使用する．
② 測定回路に大きな交流電流を流し，電束がコンデンサーから漏れないようにする．そのためには強誘電物質を使用したコンデンサーを用いる．(コンデンサーの静電容量を大きくする．)
③ トロイダルコイルの大きさは，全電束を取り込むような大きさにすべきである．
④ トロイダルコイルにファラデー・シールドをして，付近の静電場の影響を受けないようにする．
⑤ 測定回路に流す電流は正弦波の交流電流でないと解析できない．
⑥ 磁場検出用のトロイダルコイルの共振周

波数から離れた周波数の交流電流を用いること.

当然のことながら，本実験はこれらの問題点に注意を払って行う．これらの実験上の注意点は，電磁気学の基礎・基本に属する事項である.

1.3 関連する話題

アンペール・マクスウェルの法則は 1864 年に発表された．通常，物理法則は自然の観察や実験の結果から導かれる．しかし電束電流についてはよく知られているように，定常電流の作る磁場に対して非定常電流の磁場を表す法則として，マクスウェルがアンペールの法則を理論的に拡張した．これは通常の物理法則，すなわち実験によらないで出てきたものである．ロシュによると，1880 年ごろから欧米諸国を中心に，電束（変位）電流は磁場を作らないとする考えが横行していたことが紹介された．これをうけて，電束（変位）電流の概念は難しい，実験が　出来ないという理由で，中等物理教育(under-graduate)の内容から外したり，削除するような提案がなされた. 1960 年代に入り米国を中心にこの教材について検討され，本邦においても検討が加えられ同様の実験が行われた．しかし物理教育誌に 1993 年平田により“電束電流による磁界の実験的検証は可能か”とする小解説が出されて，この実験への熱は冷めた感がある．しかし電磁気学の基礎・基本をしっかり踏まえれば，本発表のようにきれいな結果が得られる.

本邦においては，ホワイトヘッド（1905 年）の実験から遅れること 15 年以上経過しても，矢島[3]によると「変位電流の電磁作用については実験的証明がないが，・・・・・」とあり，また「直接に実験的に証明できるが，それよりも，変位電流があって初めて電波という形で電磁エルギ―が空間を伝わってゆく現象が説明されることを思えば，ほとんど実験的証明はいらないというものであろう」と宮島[4]はいっている.
これらは束電流が磁場を作る実験がいかに難しいかを表したものである.

しかし，今回の演示実験を見てもらえばわかるように，この実験の簡単さに比べて教育的に得るところが大きいのでこの実験を普及させたい.

なお電磁波の波動方程式は電束（変位）電流がないと導けないことを念のために付け加えてこの予稿を終わる.

引用文献

１）横田　穣一：物理教育 60-2（2012）99-104.
２）J.Roche：Eur.J.Phys.19 (1998) 155-166.
３） 矢島　祐利：電磁理論の発達史（1947）河出書房 p97.
４）宮島　龍興：理論電磁気学（1948）東西出版社 p248.

電磁気の物理を正しく理解する

中之島科学研究所　高橋 憲明
E-mail　ntakahas@rcnp.osaka-u.ac.jp

１．はじめに

電磁気学は力学，熱学と並んで古典物理学の根幹を成すが，難しいためか，誤解や曲解が随所に見られる．本稿では，電磁場の伝播を中心に，基本となる Maxwell 方程式が教えるものを見る．伝播に必要なエネルギー密度の流れは Poynting ベクトルとして記述される．

２．電磁場

まず，どのようにして電場，磁場が生成されるのか，もう一度思い出そう．空間のある点に電荷が持ち込まれたとする．もちろん電流が流れて電荷量に変化が起きる．この変化が電磁場として空間を伝わる．電荷や電流のない空間部分では，磁場の時間変化が電場の空間の変化（回転）をつくり出し（電磁誘導），電場の時間変化（変位電流）が磁場の回転を生成しつつ伝播する．変化が終わり定常となったところで，電磁場は時間因子を含まない Maxwell の方程式の解である Coulomb の法則や Biot-Savart の法則を満たす静電場，静磁場となる．静電場，静磁場と言えども電荷，電流が直接つくり出しているのではなく，電場や磁場の時間変化が磁場や電場をつくりつつ空間を伝わった結果なのであることを認識する必要がある．

これらを記述する基本は Maxwell の方程式で，真空中の電場 $\boldsymbol{E}$ ，磁束密度 $\boldsymbol{B}$ を電荷密度 ρ と電流密度 $\boldsymbol{j}$ を使って，

$$\mathrm{div}\boldsymbol{E} = \rho/\varepsilon_0 \quad (1) \qquad \mathrm{div}\boldsymbol{B} = 0 \quad (2)$$

$$\mathrm{rot}\boldsymbol{E} + \partial\boldsymbol{B}/\partial t = 0 \quad (3) \qquad (1/\mu_0)\,\mathrm{rot}\boldsymbol{B} - \varepsilon_0\partial\boldsymbol{E}/\partial t = \boldsymbol{j} \quad (4)$$

と書く．左辺には場の量が，右辺には源を表す量（電荷密度や電流密度）が置かれている．Newton の運動法則とともに古典物理学の根幹をなす方程式である．(1), (2) はそれぞれ電気，磁気に関する Gauss の法則と呼ばれる．点電荷の周りの静電場の表式や磁荷が単独では存在しえないことを説明するのに有効であるが，自由空間の電磁波が横波であることを示すのもこれらの法則である．(3) は電磁誘導を表し，(4) は Ampère-Maxwell の法則と呼ばれ，伝導電流と変位電流が同じ資格を有することを示すことから，電磁気学の多様性を示す法則であることが理解できよう．この方程式群で物理学における近接作用がはじめて導入された．ここで

$$\varepsilon_0\,\mu_0 = 1/c^2 \quad (5)$$

で，c は真空中の光速度である．

３．空間を伝わるエネルギー

いま，Maxwell の方程式から出発して，式 (4) と $\boldsymbol{B}/\mu_0$ のスカラー積をとり，式 (3) と $\boldsymbol{E}$ のスカラー積をとって両式の引算をすると，

$$(1/\mu_0)\mathrm{div}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})+\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{E}=-\partial w/\partial t \tag{6}$$

が得られる．ここで，w は電磁場のエネルギー密度である．すなわち，

$$w=\{(1/2)\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2+(1/2\mu_0)\boldsymbol{B}^2\} \tag{7}$$

その減少を見ると, Joule 熱をのぞいた分はその点から伝わり去るエネルギー密度の流れに相当している．逆に，電場や磁場をつくり出すには電磁波のエネルギーに相当する流れが必要である．(6) 式左辺に含まれる

$$\boldsymbol{S}-(1/\mu_0)\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B} \tag{8}$$

$$|\boldsymbol{S}|=cw \tag{9}$$

は Poynting ベクトルと呼ばれ，c すなわち光速度で伝わるエネルギー密度の流れを表している．電場だけ，磁場だけでは伝播できないことが見て取れよう．

変位電流が磁場を生成しないと言う意見は, Jefimenko 流の遠隔作用的な表式をもとに議論されていることが多い．場の源は電荷であり，電流であっても，伝播の過程で，変位電流が磁場をつくっている．高校物理教科書では陽に変位電流とは呼んでいないが，磁場の変化が電場を作り，電場の変化が磁場を作りつつ電磁場が伝播するとの記述がある．まさにそのとおりである．電磁気学は物理学に近接作用を持ち込んだ初めての分野である．遠隔作用的な数式で書かれたものを見て，源から直接別の点に場をつくっていると考えてはならない．そこには伝播の物理が必要である．

因みに，電磁気学の最初に，静電荷 q が Coulomb の法則で表される静電場 $\boldsymbol{E}$ をつくるとか，定常電流 I が Biot-Savart の法則に従ってその付近に静磁場 $\boldsymbol{B}$ をつくるとか書かかれていたりする．例えば，Coulomb の式や，直線定常電流の周りの磁場

$$\boldsymbol{E}=q/4\pi\varepsilon_0 R^2 \tag{10}$$

$$\boldsymbol{B}=\mu_0 I/2\pi R \tag{11}$$

はそれぞれ点電荷がつくる静電場，直線電流がつくる静磁場で，これらは空間を伝わって広がってゆくと記述されたりする．Biot-Savart の法則に関しても然り．考えるまでもなく，上の記述は大きな誤解を招きかねない．これらの法則は Maxwell の方程式が完成する前に，電磁気現象の本質に迫るべく発見，整理されたものである．今日でも，静電気，静磁気の定量的な記述になくてはならぬものである．しかし，これらを数式化したとき，静電荷が静電場を，また定常電流が静磁場を生成する記述であると誤解してはならぬことは言うに及ぶまい．

４．おわりに

Maxwell 方程式以前の遠隔作用の考えだけでは，電磁気の物理を正しく理解するのが難しいことが他にも間々起きることを，蛇足ではあるが記しておきたい．

高校物理でマックスウェル方程式による光速度を求める授業の実践

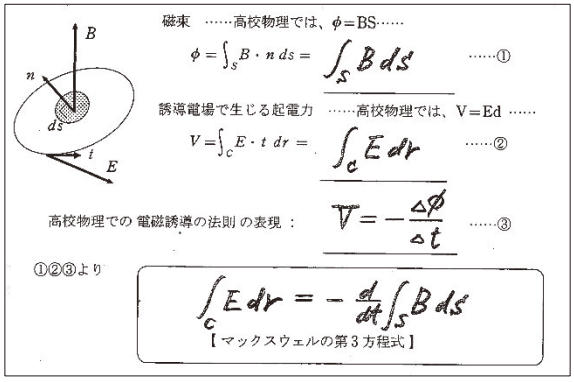
東京都立日比谷高等学校　小室　孝志
E-mail：Takashi_1_Komuro@member.metro.tokyo.jp

1　はじめに

高校物理において、天下り的に結論を紹介するのではなく、論理的に自然現象を解明していく姿勢を育成することは大切なことである。光や電磁気の章においては、光及び電磁波の速さが、秒速３０万ｋｍと唐突に紹介される形になっている。物理学の歴史において、イギリスのマックスウェルが自らの方程式により電磁波の存在を予言し、その速度を誘電率と透磁率で表し、「光学」と「電磁気学」を結び付けた功績は大変大きい。こうした歴史的経過や速さの導出課程の簡単な概略は、少なくとも大学に進学する理系に進む物理選択生徒に対しては、是非紹介しておくべき事項であり、論理的に考えていく物理を指導する立場から、高校段階からも適切に学ばせる必要がある。今回、物理の内容をすべて学習し終えた冬、3 年の理系進学希望の物理選択生徒に対し、独自の授業プリントを作成して授業を実践した。

2　実施の形態

独自の授業プリントを作成して、３年理系物理選択者（数学において微分積分の基礎的な考え方は身についている)に対して、４時間利用して、生徒に発問しながら授業を展開し、最後に実施後の記述アンケート調査を実施した。



3　授業内容の要点

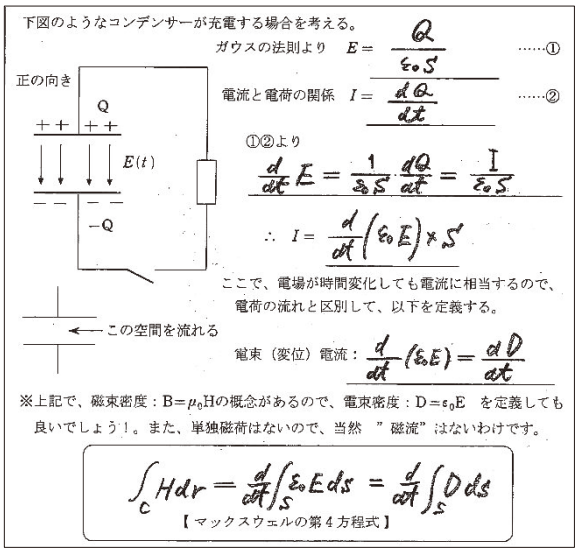
①力学の仕事の概念を踏まえ、電場や磁場における線積分や面積分の考え方、微積分を利用した数式表現の紹介。

②力学分野において力と距離の積は仕事であることを踏まえ、電磁気分野でも同様に電場（単位電荷に働く力)×円周（電磁誘導の法則）や磁場（単位磁荷に働く力)×円周(アンペールの法則)は、仕事としてとらえる見方を学ぶ。

③高校物理の電磁誘導の法則をマックスウェルの第３方程式として表現できること。

④単純なコンデンサーと交流電源だけの回路において、コンデンサーの空間だけ電流が流れず、周囲に磁場も生じない不自然さに対する疑問を提示し、生徒に考えさせ、変位電流の存在（ 電場が変化することが、電流が流れることと本質的に同じ ）を提示する。そのことから電束と電束密度の概念も紹介する。

⑤電束電流（電場の変化）によるアンペールの法則がマックスウェルの第４方程式として表現できること。

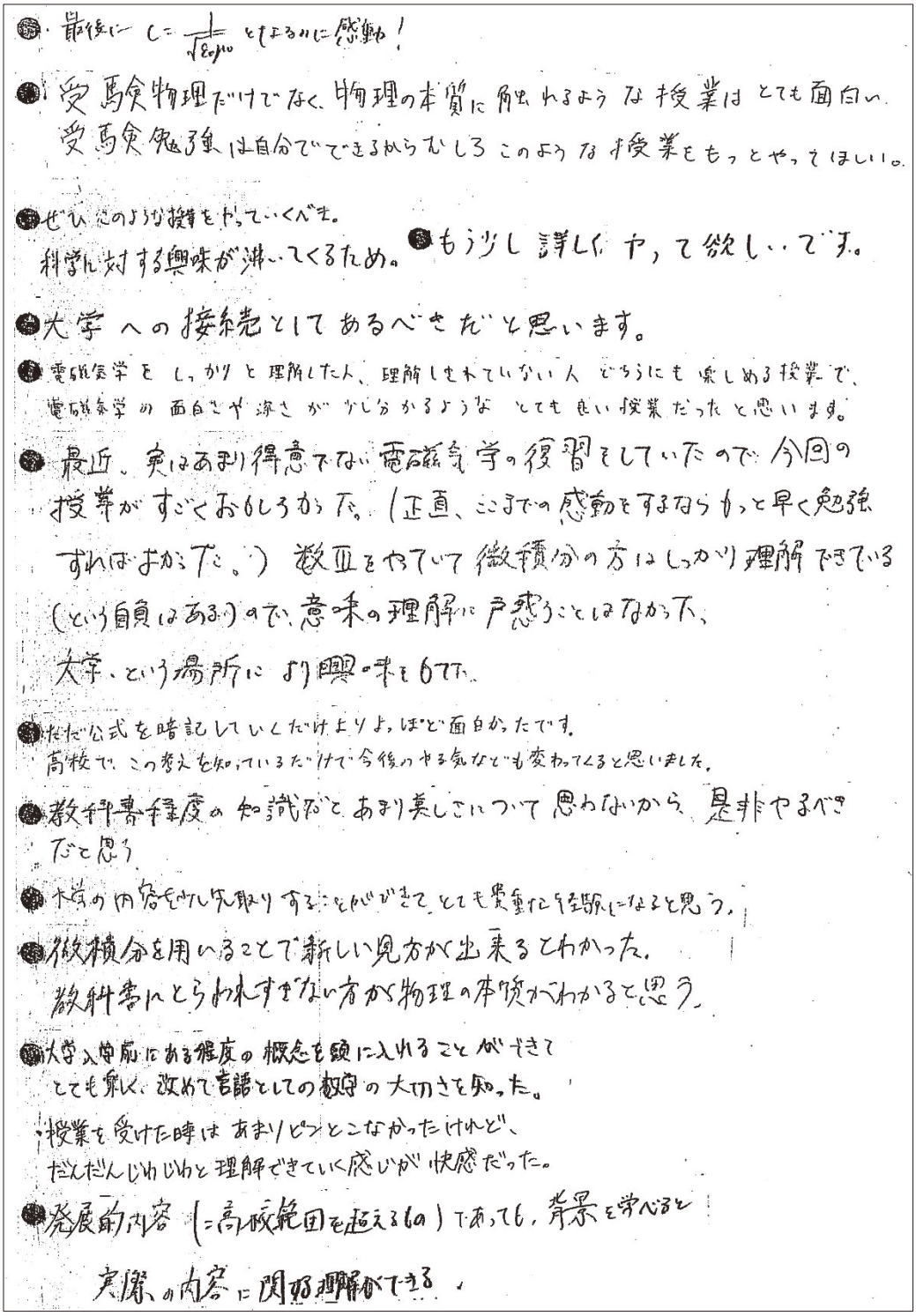


⑥簡単な閉回路でマックスウェルの第３方程式（電磁誘導の法則)とマックスウェルの第４方程式（アンペールの法則)を組み合わせることにより、光速が誘電率と透磁率で表せられることを紹介し、具体的に数値を代入し秒速３０万ｋｍを導く。

４　実施後のアンケート結果と分析

授業実施後に、生徒全員から授業に関する記述アンケートを実施した。実施についての肯定的な生徒は、学力のある生徒達程多く、一方、否定的な意見はなく、難しいと感じる生徒達は、自分の課題として、理解できるようしたいとの願望や大学進学に向けてのモチベーションの高揚につながるなどの結果となった。

現行学習指導要領のもとでも、微分積分を学んでいる３年理系進学希望生徒の物理選択者に対しては、こうした授業の実践は、決して無理のある取組みではなく、生徒達の大学進学後において、大きな意味があるのでないかと考えている。


・最後に $c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ となるのに感動！
・受験物理だけでなく、物理の本質に触れるような授業はとても面白い。
受験勉強は自分でできるからむしろこのような授業をもっとやってほしい。
・ぜひこのような授業をやっていくべき。
科学に対する興味が湧いてくるため。
・もう少し詳しくやって欲しいです。
・大学への接続としてあるべきだと思います。
・電磁気学をしっかりと理解した人、理解しきれていない人どちらにも楽しめる授業で、電磁気学の面白さや深さが少しわかるようなとても良い授業だったと思います。
・最近、実はあまり得意でない電磁気学の復習をしていたので今回の授業がすごくおもしろかった。（正直、ここまでの感動をするならもっと早く勉強すればよかった。）数Ⅲをやっていて微積分の方はしっかり理解できている（という自負はある）ので、意味の理解に戸惑うことはなかった。
大学、という場所により興味もてた。
・ただ公式を暗記していくだけよりよっぽど面白かったです。
高校でこの考え方を知っているだけで今後のやる気なども変わってくると思いました。
・教科書程度の知識だとあまり美しさについて思わないから、是非やるべきだと思う。
・大学の内容をかいつまんでお取りすることができてとても貴重な学習になると思う。
・微積分を用いることで新しい見方が出来るとわかった。
教科書にとらわれすぎない方が物理の本質がわかると思う。
・大学入学前にある程度の概念を頭に入れることができてとても楽しく、改めて言語としての数学の大切さを知った。
授業を受けた時はあまりピンとこなかったけれど、だんだんじわじわと理解できていく感じが快感だった。
・発展的内容（＝高校範囲を超えるもの）であっても、背景を学べると実際の内容に関する理解ができる。

５　文献

［1］　砂川　重信　「電磁気学の考え方」　岩波書店

［2］　竹内　淳　「高校数学でわかるマクスウェル方程式」　講談社

電球の特性について

兵庫教育大学大学院 [1]，神戸市立駒ヶ林小学校 [2]　　安楽真人 [1,2]，石原 諭 [1]
E–mail:　　satoshi@hyogo-u.ac.jp [1]

1　はじめに

理科教材として用いられている電球が非線型の電流–電圧特性を持つことに興味をもち，それに関わる研究をした。

2　電球の電流–電圧特性

電球の電流 I と電圧 E の測定結果を図 1 に示す。電球の種類によらずスケール則の異なる 3 領域に大別できる。小電流では E は I に比例し，大電流では E はおよそ $I^{5/3}$ に比例する。中間では E はおよそ I^3 に比例する。

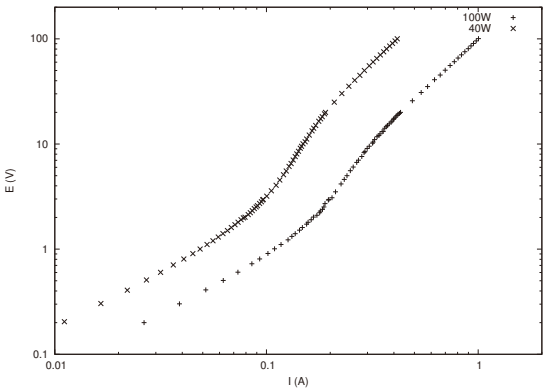


図 1: 電球の電流–電圧特性

また電球にパルス波を加えた場合の I–E 特性を測定した。パルス波の時間間隔を長くするにしたがい，電球の I と E が比例する領域が広がる。フィラメントの温度上昇が少なくなり，電気抵抗と同じ特性を示すようになる。

3　電球のエネルギー変換

電球でのエネルギー変換を記述する単純なモデルを考える。温度 T のフィラメントで，電気エネルギーが光エネルギーと熱エネルギーに変換され，室温 T_0 の熱浴に伝わると仮定する。また電球の電気抵抗 R が T に比例すると仮定する。すると熱伝導の法則およびステファン–ボルツマンの法則により，電球の消費電力 P と R は

$$P = c_4(R^4 - R_0^4) + c_1(R - R_0) \qquad (1)$$

の関係を満たす。ここで c_4 と c_1 は電球ごとに決まる定数，R_0 は室温での電気抵抗である。第 1 項は光の放射を，第 2 項は熱伝導を表す。

E と I の測定値をもとにした R および P の計算値を図 2 にプロットする。ただし P は定格電力で規格化してある。またモデル (1) で当てはめた最適値の場合の，放射および熱伝導の P への寄与も図 2 に示す。電球を定格電力付近で使用する場合は，電気エネルギーの 90%程度が光の放射エネルギーに変わり，10%程度が熱エネルギーに変わることがわかる。このようにして，電球からの光量や熱量を直接測定しなくても，R と P の関係から放射と熱伝導の割合を間接的に推定できる。

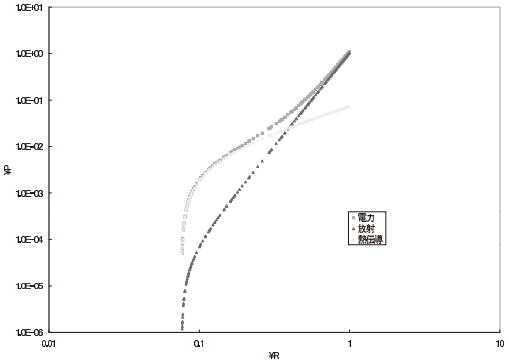


図 2: 電球の抵抗–電力特性

4　まとめ

本研究では電球の電流と電圧の測定をもとに，電球でのエネルギー変換を解析した。結果は分光測光や文献と比較して妥当であった。今後の課題として，タングステンでは温度と抵抗は比例していないことを考慮して解析をすすめたい。

ダイポール近傍静電界分布の誤差解析

香川高等専門学校[1], 草間裕介[1]
E-mail　kusama@cn.kagawa-nct.ac.jp

1．はじめに

ダイポールが作る電界分布は、原点から観測点までの距離 r が電荷間の距離 l に比べて十分大きい場合 r>>l には、余弦定理を使った近似式が適用できることがよく知られている。しかしながら、この近似が具体的にどの程度の距離まで成立するのかについては、電磁気学の教科書にはほとんど記述がない。そこで、単独電荷の重ね合わせによる厳密界、多重極展開表現における展開項数の打切りの影響、余弦定理を使った近似式の 3 つの表現方法を比較してその適用限界を定量的に評価したので報告する。

2．解析モデルと界の表現式

原点を中心として x 軸上で距離 l[m]離れた位置に置かれた±Q[C]の電気ダイポールについて考える（図 1 参照）。近似を含まない厳密表現は、単独電荷の作る電位の重ね合わせより式(1)および(2)で表される。

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right),\quad \text{where}\ \ r_1=\sqrt{(x-l/2)^2+y^2},\ \ r_2=\sqrt{(x+l/2)^2+y^2} \tag{1}$$

$$E_x=-\frac{\partial V}{\partial x}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{x-l/2}{r_1^3}-\frac{x+l/2}{r_2^3}\right),\quad E_y=-\frac{\partial V}{\partial y}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{y}{r_1^3}-\frac{y}{r_2^3}\right) \tag{2}$$

一方、原点まわりの多重極展開はるジャンドル陪関数を用いて式(3)および(4)で表現される。

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}\left[\sum_{n=0}^{\infty}\{1-(-1)^n\}P_n(\cos\theta)\left(\frac{l/2}{r}\right)^n\right],\quad \text{where}\ \ r=\sqrt{x^2+y^2},\ \ \cos\theta=\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \tag{3}$$

$$E_x=-\frac{\partial V}{\partial x},\quad E_y=-\frac{\partial V}{\partial y} \tag{4}$$

さらに、 r >>l における近似表現は式(5)および(6)で与えられる。座標系を統一するために式(6)を x, y 座標に変換すると式(7)となる。

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{l}{r^2}\cos\theta,\quad \text{where}\ \ r=\sqrt{x^2+y^2},\ \ \cos\theta=\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}},\ \ \sin\theta=\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \tag{5}$$

$$E_r=\frac{Ql}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^3},\quad E_\theta=\frac{Ql}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sin\theta}{r^3},\quad E_\varphi=0, \tag{6}$$

$$E_x=E_r\cos\theta-E_\theta\sin\theta,\quad E_y=E_r\sin\theta+E_\theta\cos\theta \tag{7}$$

本検討では計算条件として、座標(x, y)=(-1/2, 0)に負の単位電荷-1 C 、(x, y)=(1/2, 0)に正の単位電荷+1 C の点電荷を配置し、電気ダイポールモーメント p=Ql=1 を仮定した。なお、ルジャンドル多項式を含む(4)式の偏微分計算においては、定式化の煩雑さを避けるために Mathematica の微分演算機能を利用した。

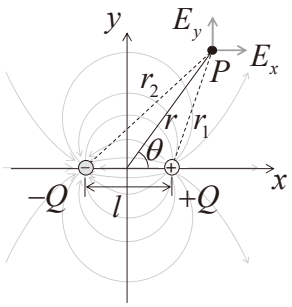


図1. 計算モデル

３．結果

図 2 にダイポール近傍の電気力線の様子を示す。描画範囲は x, y ともに[-2, +2]までとし、描画には Mathematica v11.1 の StreamPlot を利用した。点電荷の極近傍においては多重極展開、近似式ともに厳密界とはベクトルの方向を含めて大きな違いが観察できる。これを定量化するために次式(8)で誤差を定義する。

$$Error = \frac{|E| - |E_{True}|}{|E_{True}|} \times 100\,[\%] \tag{8}$$

ここで、E_{True} は厳密界の式(2)の平方和、E は多重極展開の式(4)または近似式(7)の平方和である。多重極展開の式(4)の誤差を図 3 左、近似式(7)の誤差を図 3 右に示す。描画範囲は x, y ともに[-10, +10]までとした。多重極展開における打切り項数が n=5 の場合の誤差は 12 重極、n=3 の場合の誤差は 8 重極パターンとなり、白抜きの部分を境として原点から離れるほど急激に誤差は小さくなって厳密界に近づくことが分かった。一方、最もよく使われる近似式の誤差は 4 重極パターンとなり、白抜きの部分を境として原点から離れるほど比較的なだらかに厳密界に近づくことが分かった。いずれの場合も点電荷の距離 1 m に対して原点からの距離半径 r=7 m 以上であれば 1%以下の誤差で厳密界と一致することが分かった。

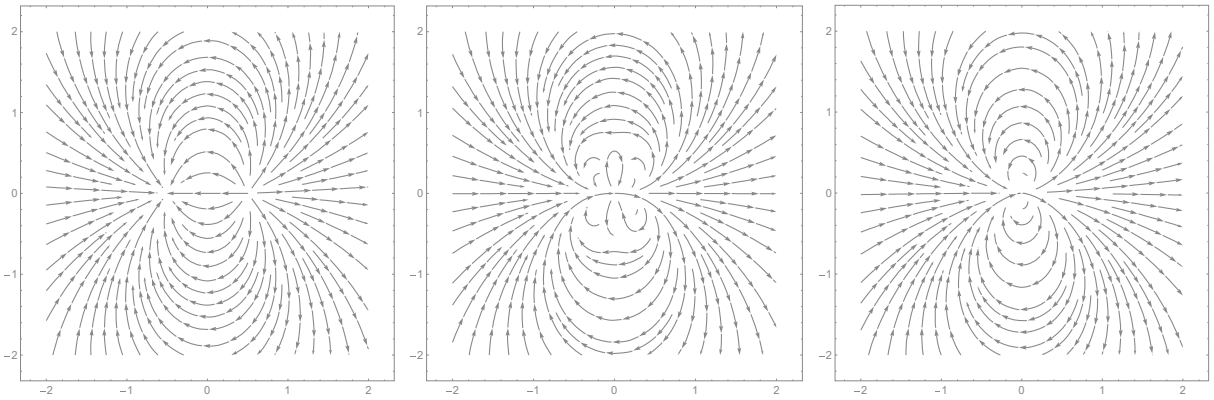


図 2. ダイポール近傍電気力線の様子。厳密界（左）多重極展開 n=3（中央）近似式（右）

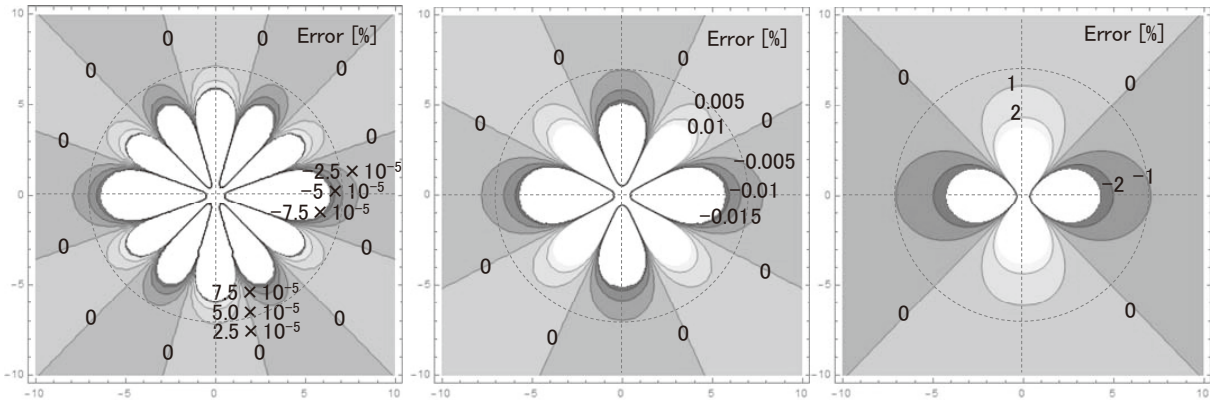


図 3. 厳密界を基準とした誤差[%]の等高線。左から多重極展開 n=5 および n=3, 近似式

４．まとめ

ダイポールが作る厳密界、多重極展開、余弦定理を使った近似式の 3 つの表現方法を比較し、その適用限界を定量的に評価することができた。

【文献】川村康文ほか，わかりやすい理工系の電磁気学，pp. 40-43，講談社

トロン温泉の教材化

公立鳥取環境大学[1], 足利裕人[1]
E-mail　ashikaga@kankyo-u.ac.jp[1]

鳥取県三朝町は世界一のラドン(^{222}Rn)温泉として有名であるが,大橋旅館には, ^{220}Rn（トロン）濃度世界一と言われる源泉「巌窟の湯」がある。浴槽の岩に付着した沈積物のγ線スペクトルは,弱いウラン系列に加え,強いトリウム系列を示す.一方,温泉水からはウラン系列の ^{222}Rn の娘核種のみ観察される[1)]。本研究は,トロンを多く含む温泉水や温泉沈積物を,霧箱や半減期の中等学校理科教材とすることを目的とした。浴槽の底の小石や砂は霧箱の線源として,α線やβ線の観察に利用でき,また汲んだ温泉水が含む ^{220}Rn は,特徴的なV字型飛跡を示す霧箱のα線源となるとともに,速やかに減衰することから半減期の短さを学ぶ教材となる.

１．はじめに

三朝温泉のトリウム系元素に関する調査は,1948年から1年間黒田和夫等により行われ,大橋旅館の上の湯（巌窟の湯）や,現在の中屋の平家の湯等,多くの源泉で ^{220}Rn が検出された。本研究では3インチNaI(Tl)シンチレーションカウンターを用い,源泉沈積物のガンマ線スペクトルによるトリウム系列やウラン系列の元素の検出を行った。図1(a)は巌窟の湯の底の石の例で,マンガンやケイ素等の酸化物からなる黒色の放射性沈積物で覆われている。^{228}Ac が見られることより,気体の ^{220}Rn に加え, ^{232}Th または ^{228}Ra が温泉水中に溶け込んでいると思われる。一方図1(b)に見られるように,温泉水中にはトリウム系列は全く見られず,速やかに沈積するものと思われる。トリウム系列の湯の花で有名な秋田県の玉川温泉でも同様であった。図1(c)は,700m離れた泉源からパイプで温泉水を引いている,薬師の湯の取水口の固着物の例である。源泉のスペクトルは巌窟の湯とほぼ同じ形を示しているが, ^{220}Rn の娘核種しか見られないことより, ^{228}Ac は長い配管壁に沈積し,トリウム系列は温泉水中の ^{220}Rn のみであると思われる。

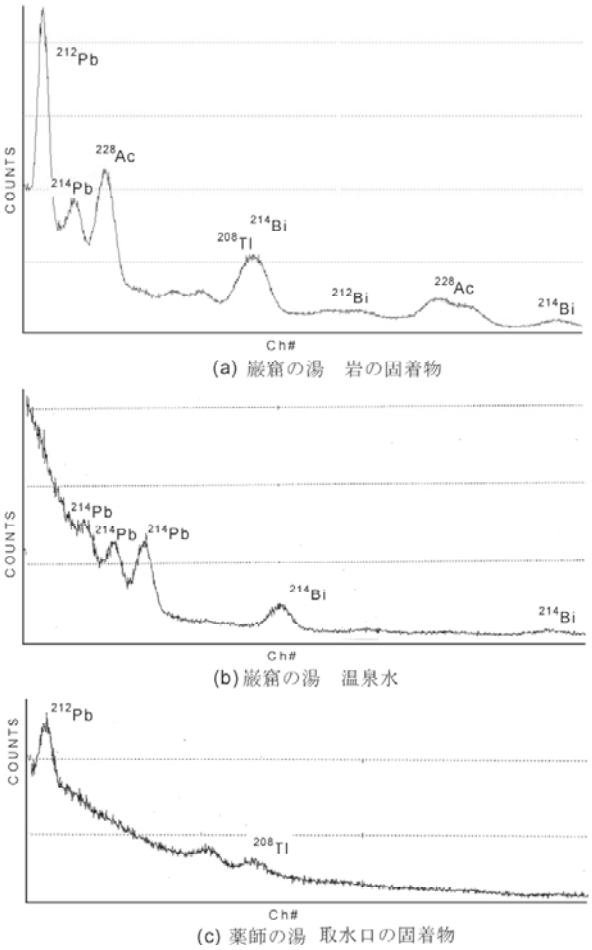


図１　各種試料のγ線スペクトル

清掃や形状により沈積物や固着物が得られにくい源泉では,図2のように,放射性物質固着用の素焼き板や球を三朝の各源泉中に沈め,数週間放置して測定した。これにより,三朝神社の神の湯や株湯,中屋,油屋等,温泉水中にトリウムの娘核種を含む源泉が多いことや,温泉水を同

じ泉源から引いている温泉等が判明した。.

図 2　温泉水中の素焼き板

2．霧箱の線源としての教材

巌窟の湯は，岩を積んだ浴槽下部に，岩盤からの沸き出し口を持つ。浴槽内の湯をポンプで全て汲みだし，湧き出た温泉水をボトルに入れ，よく振って気相中に ^{220}Rn を追い出し，霧箱に注入して観察する。図 3 のように ^{220}Rn 特有の V 字型の飛跡が観察される。これはα崩壊で生じる ^{216}Po が半減期 0.145 秒で瞬時にα崩壊するためである。^{220}Rn の半減期は 55.6 秒と短いため，霧箱に注入後すばやく観察する必要がある。トリウムを含むマントル（ランタンの芯）の販売が終了し，霧箱の線源の入手が危惧されるようになったが，図 4 に示すトロン温泉の沈積物はα線源，β線源として利用できる。また，ラジウムセラミックボールやトリウム入りのタングステン溶接棒等も利用できる。

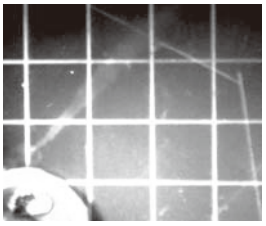


図 3　V 字型の飛跡

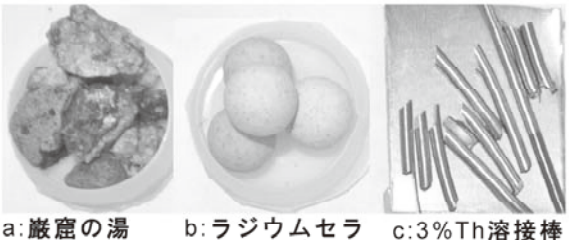


図 4　トリウム系列の霧箱線源

3．半減期の学習教材

トロン温泉の温泉水も，ラドン温泉と同様，温泉水は ^{214}Pb, ^{214}Bi が中心のウラン系列のガンマ線スペクトルを示す。泉源から直接汲み上げた温泉水は，時間とともにγ線ピーク強度が変化する。^{214}Pb の半減期をピーク強度の時間変化から求める方法を文献 3)に示した。^{220}Rn による霧箱中のα粒子の飛跡は 10 分ほどで見えなくなるため，その半減期の短さが実感できる。三朝温泉の河原の湯はラドン温泉であり，霧箱による飛跡の違いや減衰の時間変化が比較できる。

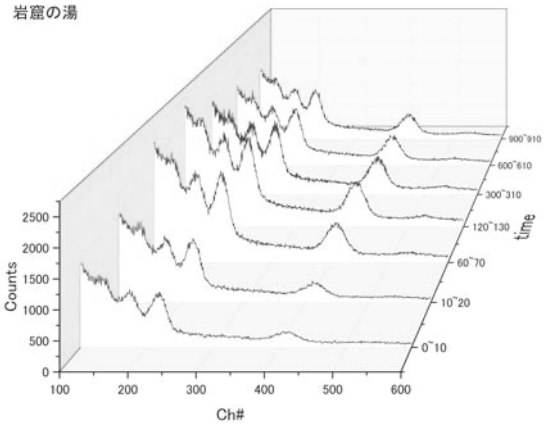


図 5　温泉水のスペクトルの時間変化

4．おわりに

現在図 6 のように，放医研で開発されたラデュエットによる ^{220}Rn と ^{222}Rn の測定を行っている。この研究は，平成 27 年度～29 年度文科省科科学技術研究費挑戦的萌芽の一環として行なっている。

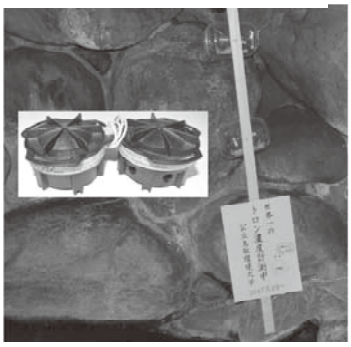


図 6　ラデュエットによる測定

5．参考文献

1) トロン温泉の教材化，足利裕人,応用物理学会予稿集,2017
2) 放射能泉と三朝温泉，御船政明，温泉科学，vol.31-3，pp.80-93（1981）
3) 三朝の温泉水を用いた ^{214}Pb の半減期の教材化，足利裕人,応用物理学会予稿集,2016

「慣性力」の測定

元麻布高校　増子寛
masuko@kdp.biglobe.ne.jp

１．はじめに

力センサと距離センサと加速度センサを内蔵し、それらの計測データをワイヤレス（ブルートゥース）で送信する台車*)（以降カートと呼ぶ）がある。そのカートの距離センサはカートの車輪に直結した回転エンコーダーを使用しているので、車輪が回転し始めたところを０点として計測を始める。

２台のカートをガイドレール（以降レールと呼ぶ）で連結し、レールの上でもう１台のカートを運動させる。カートはそれぞれの車輪が動けばその運動を計測するので、その速度を表示させて加速度を計測することができる。また距離センサとは独立に加速度センサが内蔵されているので、距離センサとは無関係にカートの地面に対する加速度を計測できる。これらの機能を使って、相対加速度を計測することができ、いわゆる慣性力による運動の解析が、計測データとともに可能となる。

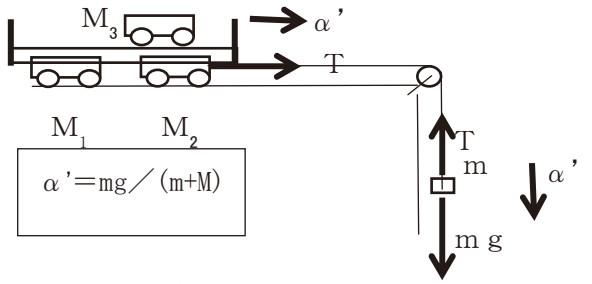
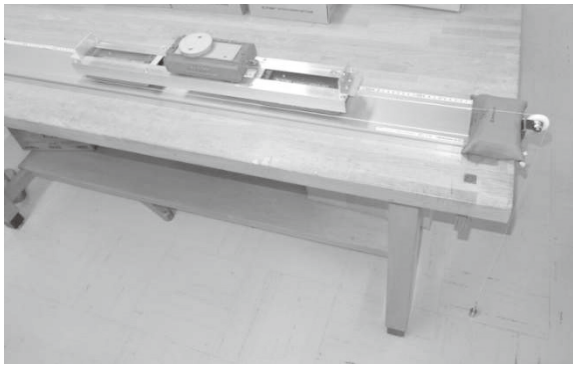


図２おもりで牽引するレールの上で運動する台車



２．レールの運動

まず、レールの上に何も載せずにおもりで牽引する。質量M_0のレールとそれを固定している２台のカート（質量M_1、M_2）全体をＡとする。このＡのみを、滑車を通して質量ｍのおもりで牽引する。Ａの質量をＭとする($M=M_0+M_1+M_2$)。この時加速度αは　$\alpha=mg/(m+M)$　で求められる。
計算値はＭ＝1.141kg　ｍ＝0.070kg **であるので、$\alpha=0.566m/s^2$ となり、実測値はレールで連結されている台車の時間に対する速度のグラフからその傾きを求めて、$\alpha=0.562m/s^2$ となった。**

３．レール上のカートの運動

図２のように、Ａの上にもう一つのカートＢ（質量M_3）を載せ、２節と同様に質量ｍのおもりで牽引する。Ａのレール上に摩擦がなければ、カートＢは机に対して動かず、Ａの加速度α’は２と同じ値になるはずである。２節と同様の方法で実測値は　$\alpha'=0.550m/s^2$　となった。カートＢが机に対して動かないことはＢのそばにスタンドの支柱などを立てておいて目印とすれば、容易に演示できる。しかし、Ｂは机に対しては動かないが、Ａに対しては運動するのでＡのレール上での移動距離が計測されていて、その v-t グラフを描くことができる。図３はＡとＢの v-t グラフとそれらの差のグラフを同じ軸上に描いたものである。Ａ上の摩擦によって若干Ａの加速度α’とＢの加速度βとの間に差が生まれるので、その差をγとした。

$\gamma=\alpha'+\beta$　となり、それぞれの実測値は、$\alpha'=0.550m/s^2$　$\beta=-0.484m/s^2$　$\gamma=0.067m/s^2$　である。

註＊）Pasco 社製「スマートカート」

図４のグラフは、レールとカートＢの時間と距離のグラフ（ｘ－ｔ）で、それらの差をとったグラフ、すなわちカートＢの机に対する位置の変化が示されている。このグラフからカートＢがほとんど動いていないことがわかる。図５のグラフは、カートＢに内蔵されている加速度センサの計測値で、これはＢの机に対する加速度を示していて、その値がほとんど０であることも明らかとなっている。

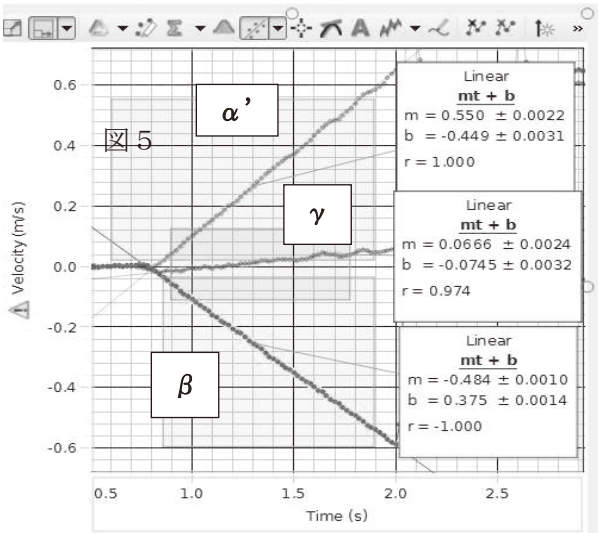


図３　レールとその上のカートの速度変化

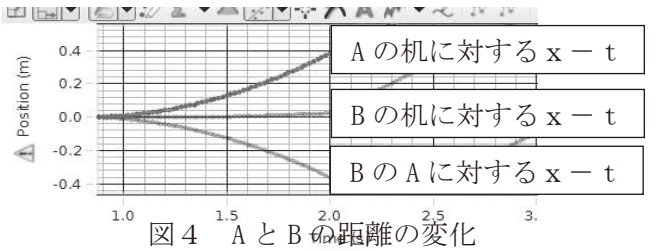


図４　ＡとＢの距離の変化

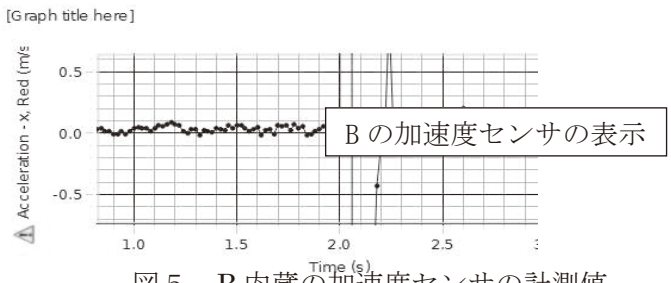


図５　Ｂ内蔵の加速度センサの計測値

これらの実験データを解析する場合、Ｂは机に対しては運動していないが、Ａの上での加速度運動はＡ上でＢに作用する慣性力によるものであると解釈して、Ａの上でのＢの運動方程式を立てる。その加速度がβとなる。

M_3＝0.302 kg　**であるので、Ｂに作用している慣性力はα’の値を使って、**

0.302×(—0.550)==－0.166N **となる。M_3のＡ上での加速度の実測値βは**—0.484m/s^2**である。**

—α’＝β　とはならずに、その差γ＝α’＋β＝0.067m/s^2 が存在することは、Ｂがレールとの摩擦でＡと同じ方向に（引きずられて）机に対して加速度運動していることを示している。

Ａ上でのＢの運動方程式は、　　M_3β＝慣性力＋動摩擦力　となる。

摩擦力として　M_3γ＝0.302×0.067＝0.020 N　を用いれば、上式は当然数値的に成り立つ。

この摩擦力を考慮すると、Ａと牽引用おもりの運動方程式からＡの加速度α’’は、結果的には同じ計算をすることになるが、

α’’＝(0.070×9.8－0.020)／(1.141＋0.070)＝0.666／1.211＝**0.549m/s^2** と求めることができる。

３．おわりに

このカートを用いることで、慣性力の授業として加速する電車の中のつり革の傾きから一歩踏み込んだものが可能になった。もちろん従来の距離センサを用いても、同じ実験は可能であるが、手間暇と見た目の簡潔さは比較にならない。レールの端に車止めをつけ、カートＢのフックをゴムに変えておいて、Ｂを車止めに接した状態でＡを牽引すると、Ｂの力センサによって、ＡがＢを押す力も計測できる。実験をしながら力学の学習の幅を広げることができるようになったといえよう。

学生実験活性化を目的としたWebコンテンツ作成と教育効果

甲南大学理工学部　梅津郁朗、青木珠緒、市田正夫、宇都宮宏章、
小堀裕巳、山﨑篤志、山本常夏
E-mail　umezu@center.konan-u.ac.jp

１．講義科目と実験のつなぎを目的としたWebコンテンツ

甲南大学理工学部物理学科では3または4年生後期配当の半導体関連の講義と、2年後期から3年前期にわたる物理学実験が用意されている。物理学実験のうち1/6に相当する時間が半導体に関するテーマに割り当てられている。カリキュラムの都合上、実験は必ず講義の前に行われる。しかし学生にとって学習していない半導体の内容は当然難解であり、実験の意味合いを把握するのが難しい。又講義を聞いている際には過去に行った実験の内容を忘れていることが多く、せっかくの実験が有効に機能しない。実験は装置に縛られるため、多くの実験科目で同様な悩みがあると思われる。そこで講義と実験の時間的、空間的なギャップを埋め、理解を深めることを目的としたWebコンテンツを作成した。実験を行なう際には厳密な取り扱いよりも、実験の内容を直感的に把握する必要があろう。そのため正確性を犠牲にして、初学者に理解しやすいように定性的でビジュアルな表記につとめた。定量的で正確な表記は講義で行なうことを前提にしている。また講義の際には定量性を重視するために、学生にとっては式を追うのが精一杯で意味が把握できず、戸惑うことも間々見受けられる。その際に定性的でビジュアルなWebコンテンツは式の持つ物理的な意味合いを把握するためにも有用となる。さらに半導体のような実学的な内容は大学を卒業して就職した後にも必要になって来ることが想定される。Web コンテンツはいつでもどこでもアクセスできるため、時間と空間のギャップを補間するのに適している。紙媒体のように資料を持ち歩く必要はなく、ビジュアルであることは記憶の片隅にあるものを定性的に結びつけ、物理的意味合いを把握する上でも役に立つ。実際のページは http://kccn.konan-u.ac.jp/physics/semiconductor/ に公開されているので興味があれば試していただきたい。太陽電池に関する具体例を図1に示す。右側にスライダーバーが設けられ、これを上下することによって光量を変化させ、電子の動きを把握することができる。自らスライダーバーを動かすことで、実験で光量を変化させたことの記憶を呼び出すことを期待している。共通のコンテンツを実験と講義で使用しており講義もしやすく、目に見えない電子の動きが記述されているため学生にも好評である。実際に卒業生が就職し社員研修でこのWebコンテンツが使われていて驚いたという話も耳にする。これは時間と空間を超えて実験、講義、実学が結びついた例と言えるであろう。

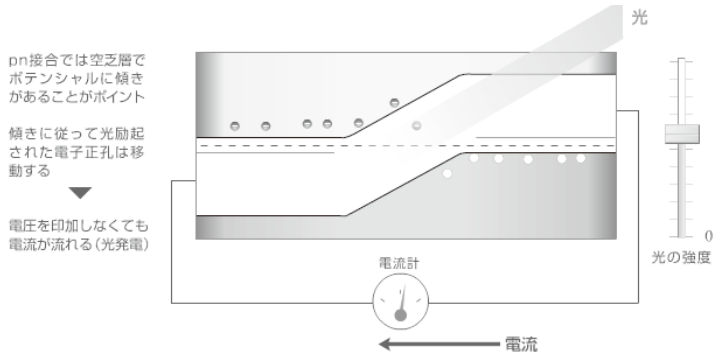


図1　物理学実験（半導体に関する実験）のWebコンテンツ例

2．反転授業的な予習を促すための Web コンテンツ

甲南大学理工学部物理学科では他大学の基礎物理学実験に相当するラボラトリーフィジックスという実験科目が 1980 年代から設けられている。名前の由来は、実験準備報告書の提出・実験実施・実験結果報告書の作成・少人数での実験結果報告会というサイクルを取り入れ、当時としては伝統的な学生実験とは一線を画すと内容と構成であるという意気込みからである。しかし、近年では学生の読解力と実験力の低下から予習による実験準備報告書が困難になってきた。そこで実験の原理と方法を Web コンテンツに掲載し予習を促すこととした。

この Web コンテンツの特徴はだだ見るだけの受動的視聴を避けるため、簡単な小問題を用意し、それに答えるようにした点である。学生の回答は Web 上に保存され、教員は実験開始前にそれをチェックすることができる。従って教員は実験開始前に予習と理解力のチェックを行うことができる。図 2 にその例を示す。右の解答欄があり、仮の回答が記入されている。この回答は教員用の Web 上で見ることができる。ただしこのようにインタラクティブな機能を持たせているために汎用性が低く現時点では一般に公開するに至っていない。

この Web コンテンツ導入後は実験がスムーズに行われるようになったという声が多くの教員から聞かれる。また学生からはわかりやすいと好評を得ている一方で、視聴のためにパソコンが必要なため不評も多い。現代はスマホ時代であるがスマホでは文字や装置の詳細が見えない。従来の実験準備報告書は学生の集中力と読解力の低下のため実験指導書を読むだけでは装置や方法のイメージがつかめず、結果として学生はイメージすることができぬままコピー＆ペーストに近い形で実験準備報告書を作成していたものと思われる。コピー＆ペーストの悪習を軽減するという意味では効果があったと思われるが、文章と図で構成された指導書を読解して自分の文章に仕上げる能力は Web 時代でも重要であることに変わりはなく、これをどこで補完するか考える必要があろう。

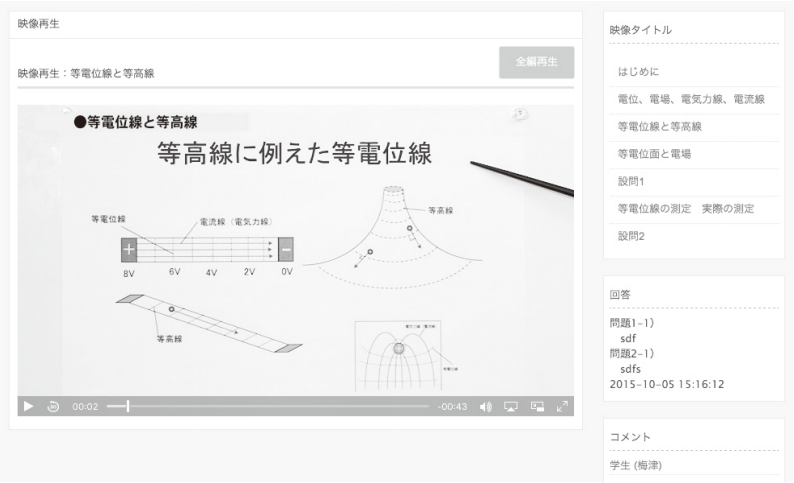


図 2　ラボラトリーフィジックスの Web コンテンツ例

3. まとめ

上記の二例は異なる形式ではあるが一定の効果が得られている。しかしながら、読解力や定量的取り扱いという点では弊害も予想される。今後も Web コンテンツ利用に関する功罪を注意深く議論していく必要があると考えている。

非弾性衝突におけるエネルギー損失を可視化する実験モデル

弘前大学教育学部　東　徹
E-mail　razuma@hirosaki-u.ac.jp

1. 製作した実験モデル

1.1　モデルの概要

非弾性衝突では失われた力学的エネルギーの一部が熱の発生に使われることは，高校物理の教科書にも記載されているが，それが物体を構成する粒子の振動エネルギーの増大に他ならないことは記載されていない。他方，生徒は物理基礎や化学基礎で，物体を構成する粒子の熱運動と温度との関係を学んでいるので，衝突現象の指導の際も粒子の振動にふれる先生も多いのではないだろうか。このとき，この現象を視覚的，直感的に理解できるようなモデルがあれば有効であると考えたので，実験モデルを紹介する。

図 1 に示したように，木片に車輪を取りつけた質量の等しい 2 つの台車をばね定数 k のばねで結んだ台車(a)は，内部の振動系を考慮したモデルであり，言わば 1 つの台車が 1 つの粒子に相当する極めて単純なモデルである。他方，内部の振動系を考慮しないモデルが台車(b)であり，その質量は台車(a)とほぼ同じとした。

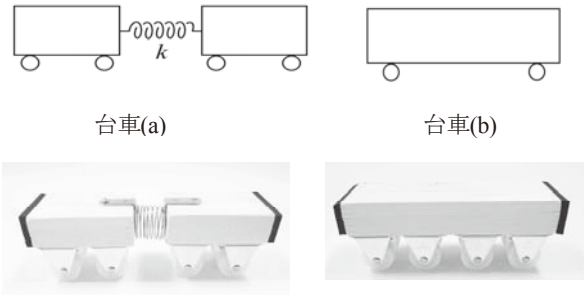


図 1　製作した 2 つの台車

1-2. 実験方法と実験結果

図 2 に示したように，斜面上から質量 M の球を落下させ，速度 u で台車(a)や台車(b)に衝突させる。衝突後，台車(a)においては，2 つの台車(p)，(q)が振動しながら進み，やがて止まる。それに対し，同じ速度 u の球を台車(b)に衝突させたときには，スムーズに動き，停止するまでの距離も台車(a)に比べて長くなる。

球を落下する高さを変えたとき，それぞれの台車の持つ衝突後の運動エネルギーと停止するまでの移動距離との関係を示したものが図 3 である。なお，ばねをとりつけた台車は，ばね定数の異なる 2 種類を用意した。図 3 では直径 1cm，ばね定数 90N/m のばねを取り付けたものを台車(a)-1，直径 2.6cm，ばね定数 15N/m のばねを取り付けたものを台車(a)-2 としている。

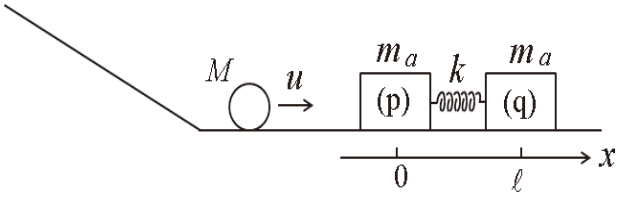


図 2　実験の概要

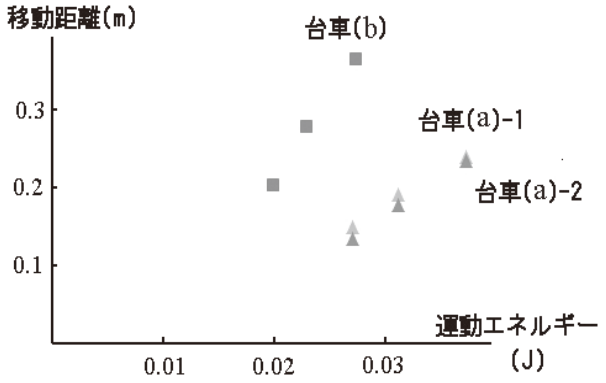


図 3　台車の運動エネルギーと移動距離

図 3 からもわかるように，内部の振動系を考慮した台車と考慮しない台車との移動距離の差は明瞭である。また，台車(a)-1 と台車(a)-2 のグラフが示しているように，結合に使われたばね定数の大きさは，それほど移動距離には関係していない。

衝突直前の球の速度，衝突直後の台車の速度は，フォトトランジスタを用いた図 4 の回路において，フォトトランジスタが OFF となる時間の測定より求めた。また，そのときの様子を図 5 に示す。球速測定用と台車の速度測定用の 2 つのフォトトランジスタを 1 つの基板に取りつけたので，基板の配置を変更することなく，両方の速度の測定が可能となっている。

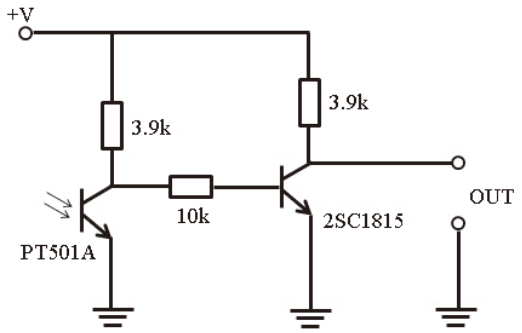


図 4　速度測定回路

図 5　速度測定の様子

2. 実験モデルの妥当性

2.1　衝突直後の台車の運動

図 3 に示した結果が妥当かどうかについて，簡単な検討を行った。図 2 に示したように，同じ質量 m_a の台車(p)，(q)を，ばね定数 k のばねで結んだ台車に，質量 M の球を速度 u で衝突させたときの運動を考える。

球と台車(p)とは非弾性衝突であり，瞬間的に行われるわけではないが，衝突の瞬間を高速度で撮影した画像（1 秒間に 30 枚）を見ると，球と台車(p)とが衝突した後，0.1 秒ほどの間，台車(q)は動いていなかった。そこで，見通しをよくするために，衝突直後は，球と台車(p)との間でのみ運動量は保存しているとし，球と台車(p)との間の反発係数 e のみを考慮することにした。

すると衝突直後の台車(p)の速度 v_a，及び，ばねで結ばれていない質量 m_b の台車(b)の衝突直後の速度 v_b は，それぞれ次のようになる。

$$v_a = \frac{(1+e)M}{m_a+M}\,u \quad , \quad v_b = \frac{(1+e)M}{m_b+M}\,u$$

2.2　停止するまでの台車の運動

$t = 0$ で球と台車(p)とが衝突し，$t > 0$ での台車(p)と台車(q)の位置を $x_1(t)$，$x_2(t)$，それぞれの台車にはたらく摩擦力を f とすると，それぞれの運動方程式は次のようになる。

$$m_a\ddot{x}_1 = k\,(x_2 - x_1 - \ell) - f$$

$$m_a\ddot{x}_2 = -k\,(x_2 - x_1 - \ell) - f$$

初期条件，$x_1(0) = 0$，$x_2(0) = \ell$，$\dot{x}_1(0) = v_a$，$\dot{x}_2(0) = 0$ のもとで解き，停止するまでの距離を求めるために，台車(p)と台車(q)の重心の位置を求めると次のようになる。

$$\frac{x_1+x_2}{2} = -\frac{f}{2m_a}t^2 + \frac{v_a}{2}t + \frac{\ell}{2}$$

ばねを取りつけた台車(a)が衝突後，停止するまでの距離 s_a は，次のようになる。

$$s_a = \frac{m v_a^2}{8f}$$

他方，台車(b)が衝突後，停止するまでの距離 s_b は，摩擦力が $\frac{m_b}{m_a}f$ であるとすれば，

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 = \frac{m_b}{m_a}f s_b$$ より求められるので，

$$\frac{s_b}{s_a} = \frac{4(m_a+M)^2}{(m_b+M)^2}$$

実験で利用した m_a，m_b，M の値を代入すれば，

$\frac{s_b}{s_a} = 1.40$ である。実測した $\frac{s_b}{s_a}$ の値は表 1 の通りである。

表 1　台車(a)と台車(b)の移動距離の比

斜面の高さ	13.6cm	16.2cm	19.3cm
台車(a)-1	1.36±0.09	1.46±0.06	1.52±0.08
台車(a)-2	1.51±0.11	1.56±0.09	1.55±0.09

全体として，比の値は計算により推定した値より大きくなっている，つまり，ばねを取りつけた台車の移動距離が少ないという結果となっている。しかし，計算に基づく値とそれほど乖離しておらず，ここで述べた台車を使った停止するまでの距離の測定は，概ね妥当なものだったと言えるのではないかと考えている。

参考文献

(1) 後藤憲一 他：『詳解力学演習』（共立出版，1971）
(2) 江沢洋 他：『演習詳解力学演習』（東京図書，1984）

スマートフォンを用いた単発現象の物理実験（音速測定、電気振動）

東京都立蔵前工業高等学校　　安達　照
E-mail　aadachi888-metro@yahoo.co.jp

1　はじめに

身近に使用されることになったスマートフォン（スマホ）には、PC の機能や物理センサー機能も搭載されており、物理教育への応用が期待される。これまで、スマホのアプリケーション（アプリ）Diracma シリーズ（DiracmaA、DiracmaJump 等）を開発し、スマホの加速度センサーを用いた実験（鉛直投げ上げ、放物運動、台車を用いた運動の法則実験、ばねの定常波等）の基礎的検討を行ってきた[1-3]。

本研究では、スマホのオーディオ機能（イヤホン出力、マイク入力）を用いたアプリを開発し、音波実験や電気実験への応用を行う。いままで PC のオーディオ機能を使った音波の実験は多数、報告されており、一定の教育効果を上げることは確認されている[4]。スマホでさらに簡単できることが期待される。現在、音波発生、音波記録などが可能なアプリはいろいろと一般公開されているが、必要なデータ分析機能がないことや、本報告のような単発現象の記録（通常はオシロスコープで測定）が難しいこと等の難点があった。そこで、アプリ”DiracmaS”を開発し、音速測定や電気振動実験についての基礎的検討を行った。

2. アプリ”DiracmaS”の概要

下記のような機能を有し、近日に一般公開する予定である。

・動作確認端末：
Galaxy SC-02C（OS 4.03）、SC-03E(OS 4.3), SC-04F（OS 6.01）

・表示画面：音圧－時間グラフ
（MPAndroidChart ライブラリー使用）

・音波発生、記録：イヤホン、マイク端子
（音波発生と記録が同時に可能）

・サンプリング周波数：44100 Hz

・分析機能： 画面のタッチ等で拡大・縮小機能、音圧の強度、時間の表示機能

3. 音速測定への応用

音速測定方法は、長さ 77.9 cm（内径 5.0 cm）の紙製の管に、マイク 1 つを管の片側（管の少し内側）に設置し、他の片方からビニールのクッション材（通称、ぷちぷち）を指で潰しパルス状の音波を発生させる（図 1　アプリのアイコンデザインは Marina 氏）[5]。スマホにマイク（スマホ用マイク付イヤホンで可能）をつないで、アプリを起動させ、Record ボタンを押してから、音波を発生（ぷちぷちを潰す）させて、再度、Record ボタンを押して音波記録を止める。Sound Graph ボタンを押すと、図 2 のようなグラフが表示される（アプリの詳細な使用方法は文献 6 に記載）。

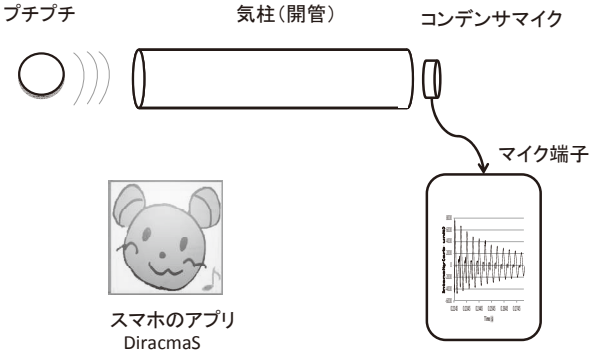


図 1　音速測定実験の概要図

図 2 のように、等間隔でパルス波形が記録される。この波形のパルス間隔を測定するために、画面上のパルス波形の頂点をタッチすると、マーカーが表示され、その時刻がｍｓ

単位で表示されるので、これを記録しておく。次に、隣のパルス波形の頂点をタッチして、同様に時間を記録し、さきほどの時刻との差を求める。管の長さに開口端補正分を考慮し、さきほど求めた時間（音波が 1 往復している時間）から計算すると、341.4 m/s となる。実験時の室温 18.0℃より音速の式から計算すると、342.3 m/s となりほぼ一致した値が得られている（管の長さを変えても同様）。

また、図 2 の波形のピーク値の減衰について、①から②、②から③等への減衰は、はじめのピーク値（①）に 0.94 を 2 回乗じると次のピーク値（②）となっている。この原因の一つとして、開口端での反射時の減衰と考えられる（反射率が 0.94）。

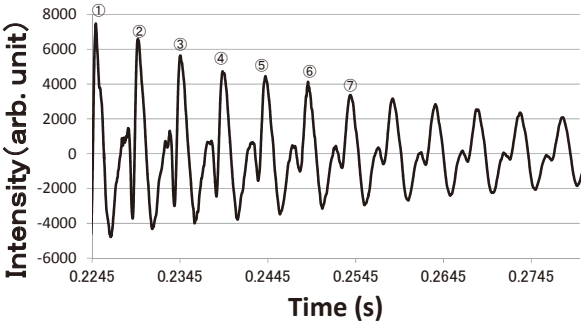


図 2　音速測定結果

4. 電気振動測定への応用

マイク端子に電気信号を入力することで、電気信号を測定した（なお、直流成分阻止用のコンデンサ 0.1 pF を直列、マイク認識用の抵抗 10 kΩを並列に入れておく）。図 3 に示すように、実験で用いた回路図は、抵抗 10 Ω、コンデンサ 0.47μF、コイル 100 mH、電池 3.0 V、スイッチ SW1 と SW2 から構成されている。スマホのマイク入力を電気回路の抵抗 10 Ωの両端に接続する。まず、SW1、SW2 をオフにし、SW1 だけをオンにして、コンデンサを充電する。その後、アプリを起動し、Record ボタンを押してから、SW1 をオフにし、SW2 をオンにする。その後、再度、Record ボタンを押して記録を止める。Sound Graph ボタンを押し、タッチ等の操作でグラフ部を拡大すると、図 4 のような減衰振動のグラフが表示される。ここで、波形のピーク間隔を画面をタッチして、測定すると、1.36 ms となっている。これを周波数に直すと 735 Hz となる。コンデンサ、コイルの値から計算した理論値とほぼ一致している（ある範囲ではコンデンサ、コイルの値を変えても同様）。

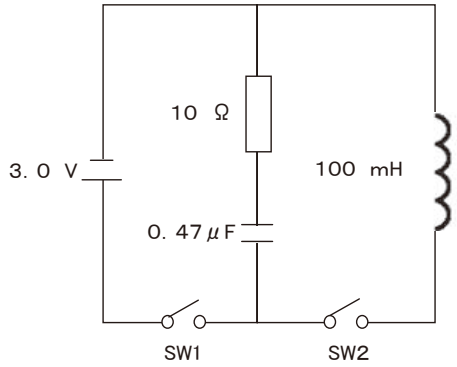


図 3　電気振動用回路（LCR 回路）

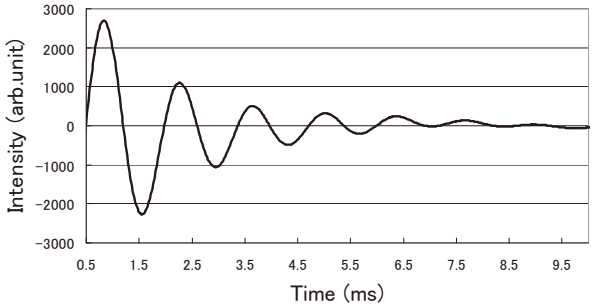


図 4　LCR 回路の減衰振動

5. まとめ

アプリ”DiracmaS”を用いることで、パルス状の音波を利用した音速測定や LCR 回路の電気振動測定のような単発現象の測定が可能であることがわかった。当日は、本アプリを使用した他の実験についても報告する予定である。

本研究は JSPS 科研費 JP17H00166 の助成を受けている。

参考文献

1)安達　照、応用物理教育 **40**(2)(2016)131.
2)安達　照、第 33 回物理教育研究大会発表予稿集(2016)99.
3)安達　照、日本理化学協会研究紀要 **48**(2016)5.
4)北村俊樹、物理教育 **55(3)**(2007)209
5)川角　博、NHK 高校講座物理(2000).
6)安達　照、日本理化学協会全国理科教育大会発表論文集(2017)

考えさせる学生実験（自由テーマ設定型実験種目の教育効果）

東京農工大学工学部
松崎清司*　畠山温　三沢和彦　太田寛人　秋葉圭一郎　小原祐樹　伊藤宙陛　迫田將仁
*e-mail matuzaki@cc.tuat.ac.jp

１．はじめに

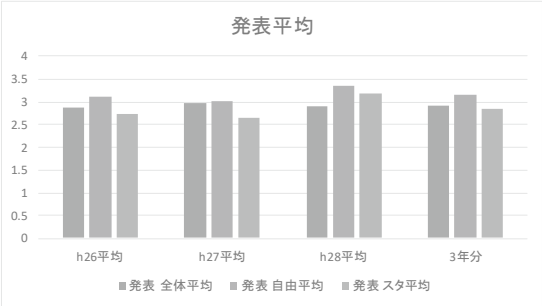
物理教育において能動的な授業方法（アクティブラーニング）が効果的であると広く認識されている．[1] 農工大工学部物理システム工学科（以下本学科）では授業だけでなく実験においても学生の能動的な取り組みを基盤とした科目を設定している。従来、希望する少数の学生が自分の発案で研究に取り組む「自由課題実験」を2,3年生に対して実施してきた。[2）3)] そしてさらに，全学生が受講する必修の３年生の学生実験において，実験内容と方法を自分たちで考えさせる形式の実験種目（以下マニュアルレス実験種目）を「熱力学：スターリングエンジン」として導入した．[4) 5) 6)] これらの自由テーマ設定型実験が物理学の理解向上，物理学の学習に対する学生の基本的姿勢の改善などにつながることを期待して研究している．本発表では，「自由課題実験」と「マニュアルレス実験種目」の教育効果を，3年生全員が行う発表会の評価から考察した。

２．発表会の実施方法

3年生実験は約10名が1班を形成し，全体で6班である。その班ごとに１週５時間，4週で1テーマ，年間で6テーマを実施する。各テーマ終了後に個人でレポートを提出する．5テーマ目が終了した後，発表会が開催される。5テーマ目の実験内容について，数名ずつの発表グループごとに, 15分程度のプレゼンテーションを本学科の3年生全員と教員に対して行う。プレゼンテーションは「発表」と「質疑」の2項目にわけて最低1点最高4点で約6名の聴講者全員より評価される。評価の観点は大まかには「発表者の主張がよく伝わる発表だったか（発表）」、「質疑応答は適切にできたか（質疑）」である。評価者は、3年間で学生数と教員数で180名程度である。教員の評価と学生全体の評価は、初年度の統計より大体あっていることがわかっている。

３．自由テーマ設定型種目の学生実験発表会の成績と評価の観点

「自由課題実験」の履修者は各発表グループにランダムに分散している。平成26年度から28年度の3年間の評価について，全発表グループ，「自由課題実験」履修者がいる発表グループ，「マニュアルレス実験種目」発表グループに分けて平均をとり，図1にまとめた。左は発表の点数、右は質疑の点数である。



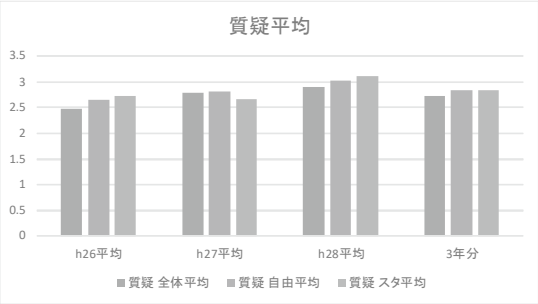


図1

グラフから「自由課題実験」履修者がいる発表グループが全発表グループの平均と比較して発表，質疑とも集計した3年間を通じてすべて評価が高いことがわかる。「マニュアルレス実験種目」発表グループは，年度ごとのばらつきはあるものの，質疑において比較的高い評価を得ている。

４．考察

3年生の学生実験の各班に分散した「自由課題実験」履修者が同じ班の他の学生によい影響を与えているため発表の評価が高くなっていると推測できる。「自由課題実験」履修者は，自分の興味に基づき研究に取り組む過程で試行錯誤，議論，発表の経験を2年生の段階から少人数教育の中でかなり積んできているためであろう。また，「マニュアルレス実験種目」班は，準備に大きく依存する「発表」より実験内容の理解度がより表れる「質疑」において評価が高いが，これは，自分たちでテーマを考えて実行するスタイルで実験を行っているためだと考えられる。実験の実施にあたり，毎週自分たちの実験結果と考察を他の学生に説明し議論する時間を設けていることも効果的にはたらいている可能性が高い。

５．謝辞

この研究は，科学研究費助成事業　基盤研究(C)一般「自由テーマ設定型の物理学実験種目の導入効果の研究」課題番号(26350187)の予算で行いました。

参考文献

１）エドワード．F．レデッシュ,「科学をどう教えるか．」,(2012)，日本物理教育学会，監訳，丸善
２）島田紘行，佐野理，庄司雅彦，仁藤修，三沢和彦，室尾和之，「学生の思考方法に着目したSAIL「自由課題実験」の新しい指導方針」，大学の物理教育(2011)17(2)，80-83
３）島田紘行，佐野理，仁藤修，三沢和彦，室尾和之「東京農工大学SAIL プロジェクトにおける「自由課題実験」と「研究室体験配属」の実施」，大学の物理教育（2010)16(2), 112-115
４）松崎清司，秋葉圭一郎，太田寛人，畠山温，三沢和彦，「自由テーマ設定型熱力学実験の開発と教育効果」，日本物理教育学会年会，第32回物理教育研究大会発表予稿集，(2015)，P127-128
５）松崎清司，秋葉圭一郎，太田寛人，畠山温，三沢和彦，「自由テーマ設定型の実験種目の設定とその教育効果」東京農工大学・大学教育ジャーナル(2016),12,1-6
６）松崎清司　畠山温　三沢和彦　太田寛人　秋葉圭一郎　小原祐樹　「大学専門課程の自由テーマ設定型熱力学実験の教育効果」、第33回日本物理教育学会研究大会、2016/8/7、新潟大学（予稿集p63-64）

ピア・インストラクション型講義の実践とグループワーク改善の取り組み

九州大学　基幹教育院, 小島健太郎[1], 原田恒司[2]
E-mail　kojima@artsci.kyushu-u.ac.jp[1], harada@artsci.kyushu-u.ac.jp[2]

１．はじめに

ピア・インストラクション[1)]（PI）は、相互作用型授業を実現する教授法の一つとして広く知られている。発表者らは、2014 年度以降、物理学の入門講義において PI を取り入れた教育実践を行ってきた。また、実践を重ねる中で、教育効果の向上を目的とした定量分析や教育手法の改善に取り組んできた。以下では、実践の概要を紹介したのち、グループワークの改善を目的として行った、PI 効率の分析とワークシートの導入について報告する。

２．教育実践の概要

本研究が対象とする PI 型講義の教育実践は、2014-2016 年度の九州大学基幹教育理系ディシプリン科目「身の回りの物理学」において実施された。この科目は、初年次文系学生を主な対象とした選択科目であり、教養としての物理学を学ぶ科目として位置付けられている。授業時間は 90 分であり、全 15 回のうち前半で初等的な力学、後半で波動や熱を扱う。各年の受講者数は、前期（原田担当）は 100～250 名、後期（小島担当）は 50 名程度であった。

PI 型講義は、主に前半の力学分野の学習において実施した。PI で扱うクイズ問題（コンセプテスト）は、Mazur による問題[1)]の和訳に加え、独自に開発した問題を利用している。問題の解答の回収にはクリッカーを利用した。PI の中で実施するグループワークは、3-5 名で実施した。

我々は、2014 年度の教育実践を終えた時点で、グループや問題によっては学生間の議論が活性化しにくい状況があることを把握した。そこで、その後 2016 年度まで実践を進める中で、グループワークの改善へ向けた以下の取り組みを行った。

３．PI 効率の分析

PI は、問題に対する個人回答、グループでの議論、再度個人回答、という流れで進められる。議論前の回答の正答率が著しく低い設問では、グループ内での教えあいが実現困難になることから、議論が有効に機能しないことが予想される。この点を定量的に把握するべく、各設問の議論前正答率 R_{pre}、議論後正答率 R_{post} のデータを用いて、PI 設問の有効性の定量的な分析を行った。

図 1 は、授業内で実施した PI 設問ごとの議論前正答率 R_{pre} および議論後正答率 R_{post} の関係を表している。対象とした授業は 2014 年度後期（18 問）と 2016 年度後期（14 問）である。後述のように、両方の年度で扱った PI 設問のうち大半は別のものである。図中の直線は $R_{\mathrm{pre}} = R_{\mathrm{post}}$ であり、議論の前後で正答率が変化しな

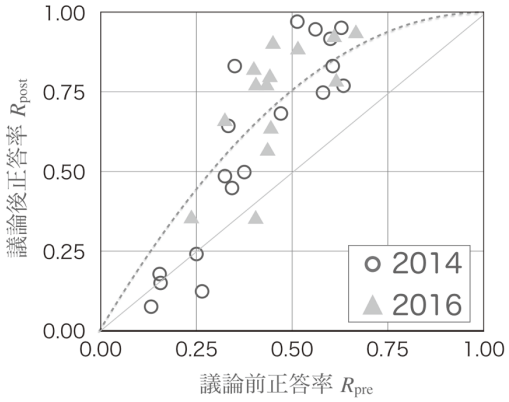


図 1　PI 設問ごとの議論前正答率と議論後正答率

い状況に対応する。また、曲線は議論の効果を予測する理論曲線で、複数の仮定のもとで導出される[2)]。なお、表 1 には議論の効果を検討する指標として、正答率のゲイン(R_{post} − R_{pre})、およびそれを事前の誤答率で規格化した PI 効率 (R_{post} − R_{pre})/(1− R_{pre}) を算出したものを示している[3)]。図 1 の 2014 年度のデータを見ると、グラフ中の左下の領域に、議論前正答率が低く、議論後も正答率が上がらない設問が複数あることを確認できる。こうした設問は、議論による理解の深まりが得にくいと考えられるため、次年度以降の利用の見送りや、内容の修正を積極的に行った。こうした検討を含め、設問内容の改善を重ねた結果、2014 年度と 2016 年度で共通して利用した問題は 3 問のみとなった。

表 1 2014 年度と 2106 年度の正答率、ゲイン、PI 効率の平均値

	2014 年(18 問)	2016 年(14 問)	差
議論前正答率	0.404	0.456	0.052
議論後正答率	0.585	0.723	0.139
ゲイン	0.180	0.267	0.087
PI 効率	0.380	0.518	0.139

４．ワークシートの導入

グループワークが機能するには、PI で扱う問題について、学生が自分の選択した回答だけでなく、回答の根拠を含めて他者に伝えることが重要である。しかし、普段の授業で議論に慣れ親しんでいない学生にとっては、回答の根拠を適切に述べることは容易ではない。我々は、この点が PI におけるグループワークの活性化を阻害する要因の一つであると考えた。そこで、2016 年度の実践においては、学生が思考を整理しやすいよう、回答の根拠を記述するためのワークシート(WS)を PI に取り入れた。学生には、最初の個人回答の際に併せて WS の記入を行い、グループワークでは、WS に書いたことを説明しながら議論するよう指示した。

５．まとめと議論

ここまで紹介した PI 設問の改善や WS の導入の取り組みは、PI におけるグループワークの改善に対して有効に機能し、授業内での質の高い議論による効果的な学習に繋がったのではないかと考えている。2014 年度と 2016 年度それぞれで、講義の最終回に実施したアンケート調査の結果を比較すると、「講義だけの授業より、グループでの意見交換がある方が楽しめる。」「クイズの後にグループで意見交換する際、他の人に説明することで自分の理解が深まった。」といった項目で、肯定的な回答が有意に上昇した。より詳しい分析結果は、発表時に報告を行う。

参考文献

1) E. Mazur: Peer Instruction, A user’s manual (Pearson-Prentice Hall, New Jersey, 1997); C. H. Crouch, E. Mazur: Am. J. Phys. 69, (2001) 970.

2) H. Nitta: Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. 6, 020105 (2010).

3) 兼田真之, 新田英雄: 物理教育 57-2, (2009) 103; 高橋春美, 新田英雄: 物理教育 57-4, (2009) 297;西村塁太, 新田英雄: 物理教育 62-1, (2014) 7.

女子の物理学習を補助する PBL 式実験授業の取組みと効果

茂木もも子（東京家政大学）[1], 宮本康司（東京家政大学）[2], 新関隆（東京家政大学）[3]

mogi-m@tokyo-kasei.ac.jp [1], miyamoto@tokyo-kasei.ac.jp [2], niizeki@tokyo-kasei.ac.jp [3]

１．研究の背景

理科教育を重視した現学習指導要領は、エネルギー・放射線などの授業時間数を増やして平成 21 年度に中学に対し前倒し実施された。この制度下で学んだ者の多くが平成 29 年度に大学 3 年生となっている。そして、新しい学習指導要領（中学では平成 33 年度全面実施）では初等教育でも物理を意識したものとなり、中学では抽象的概念を身に付けそれを応用することが求められることとなった。

一方、小倉（2013 年）などが指摘するように、物理分野に対する意識・成績には男女差が見られ、女性の方が有意に低いことが報告されている。このことは、物理の抽象的概念とその応用力の習得はとりわけ女性に対し、授業時間数を増やす、教師が教え方を工夫する、といったことで解消することは難しいことを表している。

そこで、本研究では現学習指導要領実施前後に中学で学び、その後、物理を学ぶ機会が少ないために苦手意識が高いと考えられる女子大学生に対し、PBL の手法を取り入れた物理学実験の授業の構築及び学生の意識や能力に対する把握を試みた。

２．研究の対象と方法

対象とした授業では、環境教育分野において重要な物理のテーマである「光と音」と「熱とエネルギー」を２大テーマとして実験を通して学ぶ。具体的には、教員が 4 人で一つの班となるよう学籍番号で振り分けた班編成を行い、1 班につき大テーマに含まれる小テーマを１つずつ選択させ、計 2 テーマについての実験を行う。それだけでなく、そこから抽出された物理概念が応用されている例を身体・生活・環境の中に見出す、というプロジェクトを与える。ここで取扱ったテーマを表 1 に示す。

大テーマ	小テーマ
Ⅰ　音の物理	1　音の波形・周波数、音のスペクトル
	2　音の周波数・波長・速さ
	3　スピーカー・ダイナミックマイクの仕組み
Ⅱ　音と人間	4　音の到達時間差の認識能力
	5　声・母音の周波数分析
	6　音の高低、可聴周波数、音階
	7　音階・ハーモニー
	8　物理的な音の強さと感じる音の大きさ
Ⅲ　光の物理	9　カメラの仕組み
	10　色と波長
	11　光の分光、スペクトル
	12　偏光
Ⅳ　光と人間	13　目のしくみ
	14　立体的に見えるしくみ
	15　色の見え方、ディスプレイ
Ⅴ　目に見えない光	16　紫外線(UV)
	17　放射線
	18　光の屈折と糖度計への応用

大テーマ	小テーマ
Ⅰ　体と熱・エネルギー	1　寒さ・暑さを感じるしくみ
	2　食品のカロリー（熱量）を測る
	3　体を温めるしくみ体温を一定に保つしくみ
Ⅱ　環境と熱・エネルギー	4　暑いところで体温を下げるしくみ
	5　都市生活環境と熱・エネルギー
	6　家庭生活環境と熱・エネルギー
Ⅲ　身体の測定と物理	7　活動に伴う加速度を測る
	8　電気を通して体組成を測る
	9　体の活動を測る(心電図)
Ⅳ　太陽・大気と熱・エネ	10　気温変化の記録と分析
	11　太陽エネルギー密度の測定
	12　地表面の違いと気温
	13　体感温度の測定
	14　太陽の観測
Ⅴ　熱・エネルギーの物理	15　放射温度計の原理
	16　熱量とエネルギーの等価性
	17　電気エネルギー
	18　空気(気体)の熱的性質
	19　水の熱的性質
	20　気圧測定の原理

表 1．対象授業の選択テーマ

本研究では、この授業を平成 28 年度に受講した首都圏の 4 年制大学に通う 3, 4 年生 46 名（全て女性）である。この学年は先に見た現学習指導要領の以前の中学理科教育を受けたものとみなせる。

質問紙調査を行い、質問紙項目の前半では、学生の授業への態度、意欲に関する設問を設置し、中半では表現力・思考力を把握する項目を設置した。そして後半で関心の高まりや授業達成目標に対する学生の認識、授業に関する感想等の設問を設置した。回答は、はい又はいいえの 2 件法と複数回答、自由記述式の設問を設定した。今回は、2 件法に対して行った主成分分析と、自由記述の回答に対する分析結果を報告する。

3．結果と考察

主成分分析では 2 つの主成分が見出された。第１主成分は「物理学が得意である」を主としたものであり、第 2 成分では「授業を通して物理学への関心が高まった」を主なものとして「授業を通して習得した技能や知識がある」や「質問や疑問があったときに、教員への質問や調べ学習を行いましたか」という設問に対して正の回答を得た。すなわち、第 2 成分の 3 つの質問項目への回答には関係性があることが見出された。

主成分分析の第 1 主成分－第 2 主成分の 2 次元分布を図１に示す。主成分分析及び第 1 主成分－第 2 主成分の 2 次元分布が幅広いことから、物理学分野において幅広い意識をもった学生が授業を受けていることが把握はできた。

今後、物理学の得意・不得意に限らず、多くの学生が関心、意欲を高めることのできる授業内容が必要になってくる。

本研究により、物理学分野における幅広い意識をもった学生の検出及び PBL 形式による物理学実験の授業が学生の意欲、関心を高めることが示唆された。

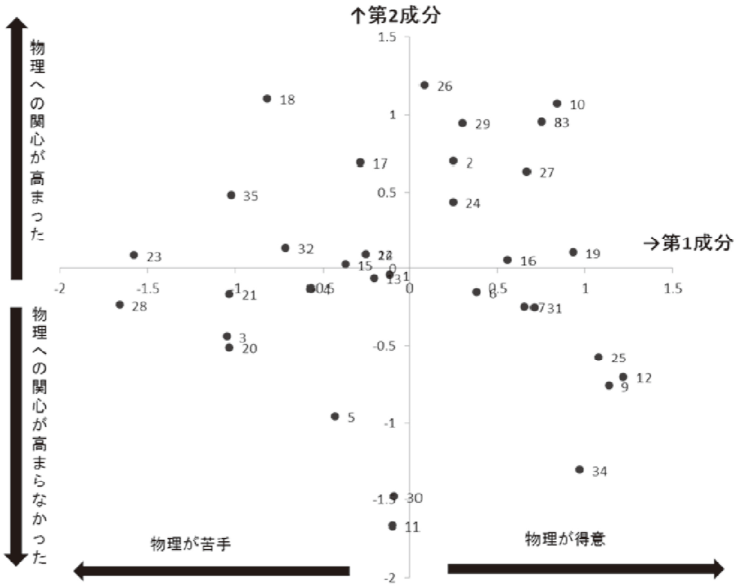


図 1．第１成分と第２成分の散布図（n=35）

第 1 主成分は物理学が得意⇔苦手という意識を主として、得意と感じている者が授業の到達目標を意識し、調べ学習や発表を工夫する傾向を示した。

一方、この物理学の得手不得手の意識を除外して現れたとみなせる第 2 主成分にはこの授業を通して物理学への関心が高まったか否かを示しているものと解釈され、関心が高まった者は質問や疑問を解決しようと行動し、授業を通して技能や知識が習得できたと感じていることが示された。中でも授業への関心を高める要素として「教員への質問、調べ学習の実施」が抽出された。

このことから、授業を実施するにあたり質問や調べ学習を行うことが、授業に対し学生の興味を強める効果があることが示唆された。

アクティブ・ラーニング型授業と聴衆応答システムを活用した形成的評価Ⅱ

東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科[1], 東京学芸大学[2], 西村塁太[1], 新田英雄[2]
m121805g@st.u-gakugei.ac.jp[1], nitta@u-gakugei.ac.jp[2]

１．はじめに

近年，物理教育研究（PER）に基づく相互作用型授業の研究や実践が盛んに行われている。相互作用型授業とは，生徒同士で議論したり実験したりするような能動的な学習活動を取り入れた授業である。

PER では，授業効果を定量的に評価するために，Force Concept Inventory (FCI)をはじめとした各種概念調査を，単元や学期の前後で実施し，各クラスの平均正答率から Hake の規格化ゲインを算出して，正答率の伸び率を求めることが多い。この方法は，膨大な生徒・学生へのインタビューに基づいて作成された妥当性・信頼性の高い調査紙を用いる点や，学校種や学力差に関係なく，生徒・学生の物理概念の獲得をどれだけ伸ばすことができたのかを客観的に評価できる点で，非常に優れている。

一方で，事前事後調査の結果は，翌年度以降の授業改善には非常に役立つが，単元や学期の途中での授業計画の修正を意図したものではない。教師としては，授業を通して，生徒が何をどの程度理解しているのかを，その場で把握し，その後の授業で理解が不足しているところを補うような授業つくりが望ましい。しかし，生徒の概念形成過程をリアルタイムで明らかにすることを目的とした研究は，聞き取り調査や発話分析（プロトコル分析）といった質的な手法に基づくものが数例あるだけである[1), 2)]。この聞き取り調査やプロトコル分析からは,生徒の物理の学習について，概念調査からだけでは得られない非常に有益な情報が得られるが，生徒の発話を一度すべて文字に起こし，そこから必要な部分を抽出し，概念化するといったプロセスを経るため時間がかかり，リアルタイムでの学習状況の把握には向かない。

そこで本研究では，学期や単元の途中の段階で，どの程度生徒が物理を理解・解釈し，概念を獲得しているのかを定量的に分析するための評価方法の開発を目的としている。本発表では，昨年度に公立高校の２年生を対象に実施した物理基礎の授業実践を例に，研究中の評価方法と実践結果を紹介する。

２．観点別学習状況の把握

生徒個別の学習状況を把握するため，本実践では学期の途中で選択肢問題を連続して出題し，それぞれにクリッカーで解答する形式の小テストを実施することとした。

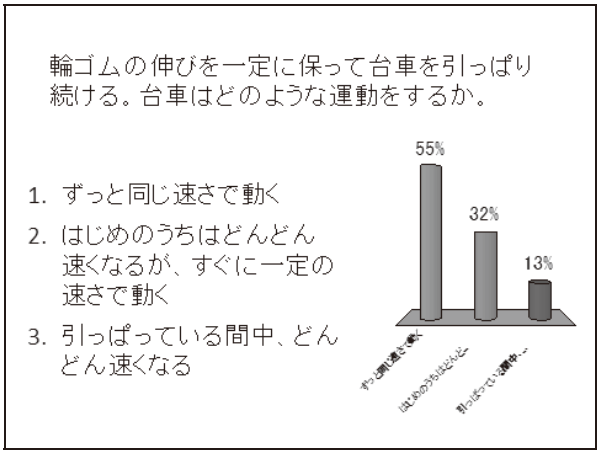


図１：問題例（学習の観点：運動の法則）

小テストで出題する問題として，FCI や PI で出題する概念を問う選択肢問題を参考にして，力学の中の小単元（例えば，運動学）の授業を一通り終えたところで，その小単元の

学習を通して生徒に身に付けさせたいと考えていた学習の観点（例えば,「速度」や「加速度」の概念など）を，一問につき一つだけ問うような選択肢で解答する概念問題を作成した（図１）。このとき，誤答選択肢はできるだけ多くの生徒が持っている誤概念に対応させ，生徒がどのような誤った考えを持っているのかも，同時に把握できるものを目指した。

このような問題を，一つの学習の観点につき数問ずつ作成・出題し，生徒に解答させ，学習の観点ごとに正答率を集計することで，その時点で生徒が何をどの程度理解しているのか，あるいは理解していないのかを量的に把握できるようにした。

また,解答にクリッカーを使用することで，クラス全体の解答分布だけでなく，生徒個別の解答結果が，解答に要した時間とともにExcel データとして保存できるため，分析にかかる時間を短縮することができた。なお，クリッカーが無くても, Google スプレッドシート等のクラウドサービスを利用したり、紙ベースで小テストを作成し,生徒に解答させ，それを教員が集計したりすることで，必要なデータを収集することはできる。

３．授業実践

授業実践は，公立高校の 2016 年度の２年生５クラス（146 名）を対象に行った。本報告では, 2016 年度１学期力学分野の実践について述べる。力学の授業は１学期間（4 月～7 月，週２時間，16 時間＋事前・事後テスト２時間）に渡って実施した。16 時間の授業の中で，生徒実験を 2 時間，ILDs を 2 時間，PI を全部で 13 問実施した。小テストは，運動学の内容を中間テスト前に，動力学の内容を期末テスト前に，それぞれ 10 問程度授業時間内で１回ずつ実施した。

図２はある生徒のFCI事前事後調査の結果を，観点ごとに集計しレーダーチャートで表したもので，破線が事前，実線が事後の結果である。図３は同じ生徒の小テストの結果を，同様に処理したもので，破線がクラス平均，実線がその生徒の結果である。

本発表では授業実践の詳細とともに, 図２，３のようなレーダーチャートや，授業を受けた生徒の声を紹介する。

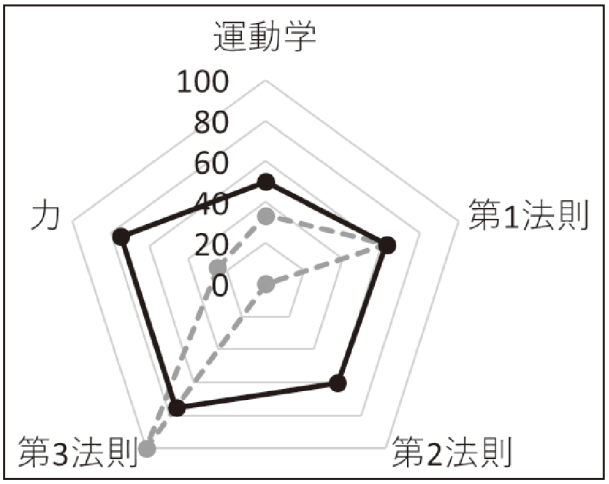


図２：ある生徒の FCI 事前事後調査結果

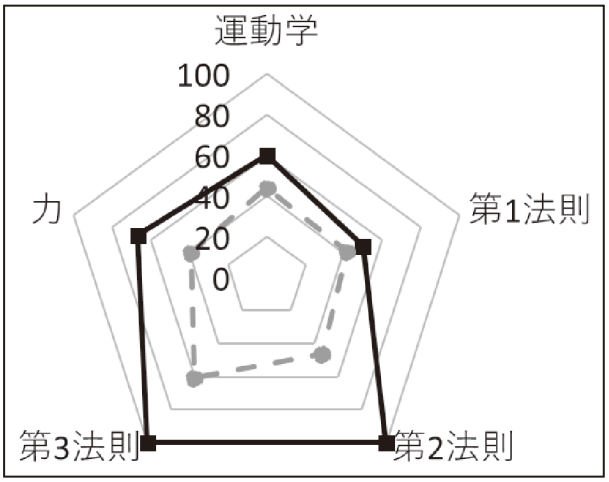


図３：ある生徒の小テストの結果

参考文献

1) 平本健太，新田英雄:物理教育 **62-3**，(2014) 167-170.

2) 山下修一:千葉大学教育学部紀要 I, 教育科学編 **44**，(1996) 223-241.

3) 西村塁太，新田英雄：2016 年度日本物理教育学会年会/第 33 回物理教育研究大会　原著講演.

多様な学習履歴を持つ学生によるアクティブ･ラーニング

久留米工大 基幹教育センター[1]，共通教育科[2]，教育創造工学科[3]
酒見龍裕[1]，江藤徹二郎[2]，野田常雄[3]，巨海玄道[1]，中村文彦[3]
E-mail　tsakami@kurume-it.ac.jp[1]

１．久留米工業大学の現状とアクティブ･ラーニング

久留米工業大学は、いわゆる全入大学とされ、受験生がほとんど合格する地方私立大学の一つである。このような大学では、様々な学習履歴を持つ学生が在籍している。工業大学でありながら、高校の物理や数学を理解しきれていない学生が多く在籍しているのが現状である。しかし、もちろん、高校の物理や数学を理解し通常の大学レベルの授業に耐えられる学生も多くいる。このように、幅広い学習履歴を持つ学生に対して、アクティブ･ラーニングを取り入れるべく、今回は、様々な取り組みを行った。アクティブ･ラーニングとは、従来の講義形式の授業と異なり、学生が能動的に授業に参加をする学習法の総称であり、物事の根本を理解させる教育法として注目されている。従来は、ある程度近い理解度を持つ学習者を対象とし行われてきたが、上述したように、我々の大学では、学生により物理や数学の理解度が乖離している。特に物理に関しては、苦手意識がある学生やそもそも興味があまりない学生も多くおり、能動的に学ぶアクティブ･ラーニングは、従来あまり行われてこなかった。また、理解度が低い学生にアクティブ･ラーニングがそもそも有効なのか、大学では議論が行われてこなかった。このような学生にアクティブ･ラーニングを用いて物理を履修させる事は、多くの問題点があるが、応用力を付けさせるためには必要不可欠な教育法であると考える。そこで今回は、多様な学習履歴を持つ学生がアクティブ･ラーニングを行った際の問題点やその対応策を報告する。

２．多様な学習履歴を持つ学生によるアクティブ･ラーニング

従来の講義形式の物理の授業では、学生にとって実際の運動をイメージができなかったり、公式の暗記となってしまったりと､物理が抽象的で分かりにくいという教科と認識されている。そこで、本学の１年生向けの物理の講義をアクティブ･ラーニングに切り替えたところ、様々な問題点が見えてくると共に､理解度に差がある学生でもアクティブ･ラーニングにより能動的に議論を行うようになった。具体的に行った授業形式は、クラス分けテストを実施し、学力上位と下位のクラスに分けた。また、講義室の机を移動し、4,5 名のグループで議論が行える場を作った。ここで、学力上位のクラスと下位のクラスで、同様な形で議論を行わせ、その様子を比較した。その結果、議論の様子が大きく異なり、上位のクラスでは、初回の授業で積極的に議論を交わし､課題に対し論理的に回答を考えていた一方で､下位のクラスでは無言のままで、ほとんど議論が進まず、一人ひとりそれぞれが課題に対し回答していた。もちろん、下位クラスでは、個人が全ての課題に答えることはできていなかったため、課題に対する理解という点でも大きく異なった。このような問題点に対し、行なった対策や課題など詳細については学会にて報告する。

大学1年次力学における対話型授業

立教大学理学部，　栗田和好
E-mail　k_kurita@rikkyo.ac.jp

1．　はじめに

大学で学生たちが物理学を学ぶ意義はその学修を通して科学的に考える力を身につけることにあると考えている。高校で物理学を学んできた学生の中にはそのような考え方を持った学生ももちろん存在する。しかし、大学入試の悪影響で問題をパターンに分類し、短時間で問題を解くパフォーマンスに喜びを感じる“物理問題ファン”も多数存在していると感じている。また、入試の多様化により大学の物理を学ぶ基礎力が身についていない学生まで存在している。意欲と能力の両面でばらつきの大きい学生集団に“考える力”を身につけることの重要性を伝えるには講義型授業は大変不効率である。

これまで考える力を伝えるために様々な工夫をしてきたが、ことごとく失敗に終わった。しかし、失敗を重ねながらも改善が見られるところもあり、引き続き試行錯誤を継続している。主体的に考える態度を醸成する授業改善の試みを今年度から久しぶりに担当することになった力学授業を例に報告する。

2．　これまでの授業の問題点

もう 10 年以上前になるが物理学科１年次生向け必修科目の力学１を担当したことがある。当時は教育経験が浅く、とにかくわかりやすい講義を心がけた。質問や要望などをリアクションペーパーで歓迎したところ学生から一定の満足度を得られたものの、結果的に彼らの受動的態度を助長してしまった。授業アンケートから授業外学習時間が極端に短いことと物理学科らしい授業を受けられていない不満感を抱いている割合が高いことが判明したのである。

その後、とある物理教育のシンポジウムで出会った Eric Mazur のピアインストラクション[1]に興味をそそられた。DVD[2,3]で紹介されている予習課題を組み合わせた授業実践は自分の授業でも実現可能に思えた。そこで当時担当していた初年時導入科目でその手法を取り入れることにした。実践してみると計画に反して多くの問題に出くわした。その主なものを箇条書きにすると、①宿題にしても自習をしてこない学生が多い、②議論を促しても黙っている、③教員がしゃべりだすと学生が居眠りする、④クリッカーの配布・回収に手間と時間がかかる、⑤わからないことをほったらかしにする、などである。

3．　改善に向けた工夫

試行錯誤するうちに、上述の問題に対処するヒントが見えてきた。学生の状況を教員がよく理解すれば改善できる点は少なくないということである。以下に力学１で行った対策を各問題に対応させて列挙する。

① 宿題は毎回シラバスに書かれた次回のテーマについて教科書を読んで理解した上で

blackboard(商用の学習管理システム)上の３つの質問に答えることである。教科書を自力で読む訓練が不足していることが原因で読み取れていない学生が多いと予想し、問１，２は教科書の難解なところや勘違いしやすい図の説明を５肢選択に書き出し、正しい又は間違った記述を探させて読み取りサポートをするようにした。問３は必ず疑問や質問を問うもので、記述式である。授業の前に教員がすべての質問に個別に答えたのちそのやり取りをファイルにまとめ、学生に Q&A として掲示した。授業内容は教科書をなぞるのではなく学生たちからの質問が集中したところの補足説明に絞り相互議論の時間を捻出した。

② 議論に慣れておらず何をどうしたら議論になるのか理解していない学生が多い。間違ったことを言うと恥ずかしいという思いが強い物理学科生は物理の問題だからこそ議論ができない傾向があることもわかった。教員が共同学習グループ[4]に分けて役割分担をして議論を促したところ、ある程度の会話が生まれるようになった。

③ 自分が疑問に思ったことを教員がしゃべっているときは眠くならないらしく、学生からの質問に対する答えをしゃべっているときは居眠りする学生が少ないことがわかった。

④ クリッカー問題も一部利用しているが、今は全学生に普及しているスマホで blackboard にログインさせて選択肢を選ばせる方法で代用できている。学生個人の答えを記録・採点することもでき、クリッカーの配布回収を協力してもらっていた４名の学生補助が不要になった。

⑤ 予習の際に教員に質問ができることと、グループ討論の際に他の学生に聞ける環境が整いつつあるため、授業中にわからないことを理解しようとしている姿勢が多くの学生に浸透している。

４． 成果と課題

学期のはじめに時間を割いて科学的に考えることの意義やグループに貢献することの重要性をまず学生に説明[5]したが、学生たちはそれを納得してくれたと感じている。とはいえ 45 分のグループワークの時間にクラス中を巡回して各グループに声を掛けたりワークの状況を質問したが、議論をせず個人で問題を解いている学生も散見された。グループワークを評価する学生がいる一方で通常授業を要望し続ける一部の学生が存在している。今後はグループでの議論を巻き起こしやすいグループ問題の工夫とともに多様な学生の学ぶスタイルをなるべく受け入れられるよう改善を考えていきたい。

参考文献

[1] Eric Mazur, “Peer Instruction: A User’s Manual”, Benjamin Cummings, San Francisco, 1996.
[2] Eric Mazur et al., “Interactive Teaching DVD”, Derek Bok Center ed., Addison-Wesley, Boston, 2006.
[3] G. Novak, A. Gavrin, W. Christian, and E. Patterson, “Just-In-Time Teaching: Blending Active Learning with Web Technology”, Benjamin Cummings, San Francisco, 1999.
[4] 金長正彦 “電通大の物理教育で実施している Active Learning”および参考文献, http://www.ne.rikkyo.ac.jp/~kurita/upec (2017/7/7 アクセス)
[5] 小林昭文「アクティブラーニング入門」産業能率大学出版部 (2015)

Newton力学的一般相対論による素粒子の計算

三重県立津工業高等学校　徳田雅彦

baku3371@yahoo.co.jp

１．はじめに

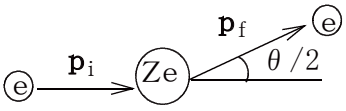
一般に現代物理学を代表するのは、一般相対論的宇宙論と素粒子論である。しかしこれらは敷居が高く大学院レベルであり、とても高校生の手には負えない。しかし、Newton 力学的一般相対論は高校生でも Schwarzschild 外部解や光の湾曲や水星の近日点移動程度なら非常に簡単に計算でき、さらに重力と静電場の統一場理論も簡単に構築できる。これらについては一昨年度にすでに発表した。

本年はこれに続けて、量子電磁気学(QED)で計算される Mott 散乱と Compton 散乱－クライン・仁科の公式－について Newton 力学的一般相対論の統一場理論を使えば同等の結果を得ることを示す。さらにベーテや朝永らが計算したラムシフトについても本理論で実験値とほとんど同じ値を得ることができる。しかもこの計算は QED のように発散が現れない。

２．ラザフォード散乱－Mott散乱－公式の導出

質量m，電荷ｅの荷電粒子が電荷Ｚｅの原子核の Coulomb potential Ｖ(ｒ)=－κ／ｒで散乱する現象である。Newton 力学での粒子の軌道を表す式と微分断面積ｄσは、核の電荷をＺｅ、ｖとＪを粒子の速度、角運動量、θ／２を散乱角として次式で表せる。

$$r=\frac{J^2/m\kappa}{1-\varepsilon\sin\phi}\quad ただし,\quad \varepsilon=\sqrt{1+\frac{2EJ^2}{m\kappa^2}},\quad \kappa=-\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0}$$



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\left(\frac{\kappa}{4E}\right)^2\frac{1}{\sin^4(\theta/2)},\quad E=\frac{1}{2}mv^2\quad (\Omega：立体角)$$

これを本理論の統一場理論に拡張すると、荷電粒子の energy 保存則の式は $\phi=\theta/2$ として、

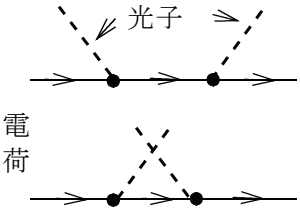
$$E^2=m^2c^4\left[1-\frac{2}{c^2}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\frac{1}{2}r^2\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2-\frac{e}{m}V(r)+\frac{e}{m}V(r)\frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right\}\right]$$

と表せる。これから Coulomb potential による energy の補正を求めることができる。この補正項を含めて微分断面積を計算すると量子電磁気学(QED)の結果と一致する。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\frac{Z^2e^4\left\{1-\beta^2\sin^2(\theta/2)\right\}}{64\pi^2\varepsilon_0^2c^2|\mathbf{P}|^2\beta^2\sin^4}$$

$\mathbf{P}=m\mathbf{v},\beta\equiv v/c$

ｖ：速度，ｃ：光速



なお、これを重心系に変換すれば、電子－陽電子散乱(Bhabha 散乱)も計算でき、QED の計算結果と同じ式が得られる。さらにこれから μ 粒子の質量を求めることができるが、電子の 194 倍と実測値の約 206.7 倍とややずれた。素粒子の標準模型ではＺボソンの交換であるが、本理論ではクーロン場の補正で解決できる可能性がある。

３．コンプトン散乱－クライン・仁科の公式の導出－

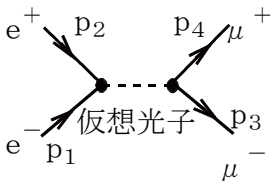
コンプトン散乱とは光子が電子に散乱される現象で、右の Feynman 図のように２つの過程がある。統一場理論での光子の入射波と散乱波の４次元線素の式は、それぞれ次式で表せる。

$$\frac{1}{2}\left(\frac{d\left|\bar{x}_{入}\right|}{dt}\right)^2=c^2,\quad \frac{1}{2}\left(\frac{d\left|\bar{x}_{散x}\right|}{d\lambda}\right)^2=\frac{1}{2}Cc^2\left(\frac{dt}{d\lambda}\right)^2+\frac{1}{2}C^{-1}c^2\left(\frac{dt}{d\lambda}\right)^2-\frac{1}{2}\left(\frac{d\bar{y}_{散}}{d\lambda}\right)^2$$

ｘは入射光の方向である。ただし、散乱の仕方は２つの過程をあわせたものになっている。λは時間の parameter であり、C は電子が光子のエネルギーを一部吸収する関係からできる係数で、$\omega_{入}$，$\omega_{散}$をそれぞれ光子の入射波と散乱波の角振動数として、$C=\omega_{入}/\omega_{散}$である。これから、散乱断面積を求めれば、QED での計算と同じく次式のクライン・仁科の公式得られる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\frac{1}{2}r_e^2\left(\frac{\omega_{散}}{\omega_{入}}\right)^2\left\{\frac{\omega_{散}}{\omega_{入}}+\frac{\omega_{入}}{\omega_{散}}-\sin^2\theta\right\}$$

(r_e:古典電子半径，θ:散乱角)



４．ラムシフト

Lamb shift とは水素原子の２ｓ$_{1/2}$，２ｐ$_{1/2}$軌道のエネルギー準位に差ができる。これを量子電磁気学で計算すると無限大に発散する。これをベーテは半古典論でくり込み計算で実測値に近い値を得た。さらに量子電磁気学で計算を行ったのが朝永やファイマンらで、この成果でノーベル賞を受賞した。しかし、この計算は数学的に問題があり、朝永はあくまで過渡的なものと捉えていた。

これについて、Newton 力学的一般相対論の統一場で考えると、電子の４次元微小線素式は

$$ds^2=\left(1+\alpha^2\frac{4\phi_e^2}{c^4}\right)^{-1}c^2dt^2-\left(1+\alpha^2\frac{4\phi_e^2}{c^4}\right)d\sigma^2 \quad ①$$

$$-\beta d\ell^2=-\alpha\frac{2\phi_e}{c^2}c^2dt^2-\alpha\frac{2\phi_e}{c^2}d\sigma^2-\alpha\frac{4\phi_e v_\phi}{c^2}dtrd\phi \quad ②$$

$\alpha^2\frac{4\phi_e^2}{c^4}$，$\alpha\frac{4\phi_e v_\phi}{c^2}$ は一般相対論的補正項である。

になる。ただし、$d\sigma^2=dr^2+r^2d\phi^2$，$v_\phi=rd\phi/dt$ ，$\phi_e=e/4\pi\varepsilon_0 r$ ，$\alpha=\sqrt{\pi G\varepsilon_0}$ ，$\beta=m\alpha/e$である。相対論的補正項を無視すれば、水素原子の微細構造が得られる。

$$E_{nj}=m\left\{-\frac{\alpha^2}{2n^2}-\frac{\alpha^4}{2n^4}\left(\frac{n}{j+1/2}-\frac{3}{4}\right)\right\}$$

（α：微細構造定数、n=1，2，…，　j=1/2, 1, 3/2, …，
m：電子の質量，ℓ＝σ）

ここで、①の補正項は Reissner － Nordstrøm 解と一致し、Bohr 半径の大きさでの時空を歪ませるエネルギーシフトの大きさ δU_B は4.58×10^{-25}［J］になる。②式は電子の運動エネルギーを表しており、その補正項の大きさは4.82×10^{-25} Jになる。この２つを合わせると振動数のずれ $\nu_{2p\frac{1}{2}}$ は 1055Mz となって、これは実験で値 1057Mz とほぼ一致する。この計算は発散の困難がなく、正確な値を得る。

４．水素原子における電子の異常磁気モーメント

水素原子の電子が基底状態にある場合の運動エネルギーの式は次式で表せる。

$$\frac{1}{2}\left(r\frac{d\phi}{dt}\right)^2=\frac{e}{m}\left\{1+\frac{3}{c^2}\left(r\frac{d\phi}{dt}\right)^2\right\}\phi_e$$

（ｄφ／ｄｔ：角速度）

基底状態での運動エネルギーK’は、基底状態のスカラーポテンシャルをϕ_Bと書くと

$$K'=\left(1+\frac{6e\phi_B}{mc^2}\right)e\phi_B=\left(1+3\alpha_f^2\phi_B\right)e\phi_B$$

（α_f：細構造定数）

と書ける。この補正項があるため、電荷ｅ，Planck 定数ｈ，質量ｍが繰り込みによって補正される。この補正で得られる水素原子の基底状態にある電子の磁気モーメントμ'は
基底状態でのμ_Bを補正した式に書き直すと

$$\mu_B'=\frac{e'\hbar'}{2m'}=(1+2.333E\text{-}03)\frac{e\hbar}{2m}$$

となり、実験からｇ＝2.0023193043737 なので、0.60％程度のずれで一致する。

５．まとめ

Einstein は量子力学の構築は電磁場を幾何学構造に組み込む統一場理論の完成の先にある述べた。

その後、内山ゲージ理論やヤン・ミルズ理論によってゲージ理論が確立され、相対論的場の量子論に取り入れることによって、QED のみならず素粒子の標準模型にまで発展した。しかしその副産物も大きく、発散などの問題は解決していない。また、理論も難しくなり、一部の好奇心と数学センスを持ち合わせた特定の人にしか理解できなくなっている。しかし Newton 力学的一般相対論は古典論ながら、散乱計算や繰り込み理論の計算が意欲的な高校生や学部初年級でも可能になるほど簡単になる。しかも Einstein が成功しなかった統一場理論も簡単に理解できるものになっている。

かつて内山氏は Einstein の手法は数学的すぎると述べたが、本研究は Einstein の計量テンソルで統一場理論を構築する手法を引き継いだ。その結果、古典論であるが水素原子の微細構造ラムシフト程度なら高校生でも計算が可能になった。このことは素粒子論も古典論の範囲なら、高校生や学部初年級でも理解でき、しかも最先端の研究にも対応できる可能性を持っていることを示している。

磁性体モデルと学級の状態

西宮市立上甲子園中学校　小山和男[1]，兵庫教育大学自然系物理学教室　庭瀬敬右[2]
E-mail：ka.koyama@edu.nishi.or.jp[1]，niwase@hyogo-u.ac.jp[2]

１．はじめに

統計物理学では，多体系の細部に立ち入らず，系全体を統計的に記述することによって巨視的な法則を導く。人間社会は複雑で多様であるが，個人の微視的な部分には注目せず，人の集団で起こる現象を統計物理学的に巨視的な視点で取り扱うことは，興味深い課題である[1)]。本研究では，そのようなアプローチを紹介すると共に，学校教育現場への適用の可能性を探る。統計物理学的なモデルによって学級状態を一つの近似として数理的に表現し，その変化を特徴づけるパラメーターの数値化を行った。

２．スピン変数による学級集団モデル

集団を構成する一人一人の状態を数理的に表現することは，個々の状態や実際に起こる現象が複雑なため，正確な記述は難しい。しかし，ある限定された側面だけに注目すれば，一つの近似として数理モデルで表現できる可能性がある。例えば，個人の意見や態度が対極した二つの状態は，“賛成か反対か”などで表されることがしばしば起こり，その二つのどちらかの状態を選択することが迫られる。そのような場合は，個々の行動が表面上は比較的単純に現れる。本研究では，そのような状態を磁性体イジングモデルの二値的表現に対応づけることを試みた。個人の意見や態度に関しては，個人どうしの繋がりを相互作用として定式化し，統計力学的に扱い，個人の詳細に立ち入らずに表面上に現れる認知可能な現象に着目し，集団を統計力学的な多体系として捉える。

２．１　データの収集

本稿の学級モデルでは構成要素間の相互関係が重要になる。相互関係を調査する目的で，次の調査を行った。

調査対象：兵庫県のＮ中学校，全校生徒 587 名
調査時期：2016 年 7 月
調査方法：いじめに関するアンケート調査
アンケート内容から一部抜粋：

(i)「クラスの雰囲気が良くて，みんなが優しいと，あなたも優しくなりますか？」
　a:自分も優しくなる。 b:周りに依存しない。
(ii)「クラスの雰囲気が悪くて，みんなが意地悪だと，あなたも意地悪になりますか？」
　a:自分も意地悪になる。 b:周りに依存しない。

同じ対象者に時期を変えて（2016 年 12 月），次の調査も行った。

(iii)「授業中，クラス全体が集中していると，あなたも集中しますか？」
　a:自分も集中する。 b:周りに依存しない。
(iv)「授業中，クラス全体がザワザワしていると，あなたも喋りますか？」
　a:自分も喋る。 b:周りに依存しない。

個人の心理状態を複数の項目に分けて２値的状態で表現し，磁性体イジングモデルを模倣して学級モデルを構成する。そのために，個人と集団との関わりがあるような項目を選び，２択のアンケート調査を行った。

調査対象：兵庫県のＮ中学校より３つの学級Ａ，Ｂ，Ｃを選抜して短期間集中調査を行った。
調査時期：2016 年 10 月（5 回）
調査方法：２択方式クイックアンケート調査
アンケート内容から一部抜粋：

①「今日の授業態度は？」
　a: 良かった　　b:悪かった
②「朝学活の態度は？」
　a: 落ち着いていた　b:落ち着きが無かった
③「人に対して優しくできましたか？」
　a: できた　　b:できなかった

２．２　スピン変数の設定

イジングモデルは正反対の方向をもつ二種類の磁気双極子を単位として構成されているが，ここからは物理の慣習に従い，その単位を「スピン」と呼ぶことにする。正の方向のスピンを「↑」，負の方向のスピンを「↓」と表記する。また，スピンの状態を表す確率変数をσとし，↑のときは$\sigma = 1/2$,

↓のときは$\sigma = -1/2$と数値化する。スピン↑とスピン↓の和は打ち消し合う。このσをそれぞれアンケート①～③に対応させて，学級スピンモデルを設定する。アンケートの回答 a をスピン↑に，b をスピン↓に対応させる。

２．３　スピン集合の確率過程

スピン↑の総数を$n_\uparrow$，スピン↓の総数を$n_\downarrow$とする。時間の経過に伴って$n_\uparrow$と$n_\downarrow$は確率的に変動するが，スピンの合計$n_\uparrow + n_\downarrow = n$は不変であるために１変数での表現が可能である。ここで，新たな変数xを

$$x = \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{2n} \tag{1}$$

と定義する。変数xの範囲は$-1/2 \le x \le +1/2$である。

スピン↑の総数$n_\uparrow$とスピン↓の総数$n_\downarrow$は確率的に変動するので，スピン↑からスピン↓およびその逆に変動する遷移確率をそれぞれ$p_{\uparrow\Rightarrow\downarrow}(x)$，$p_{\downarrow\Rightarrow\uparrow}(x)$とする。本研究では，様々な分野で有効性が確認されている次の遷移確率を用いる[2)]。

$$p_{\uparrow\Rightarrow\downarrow}(x) = \nu \exp\{-(kx+h)\},$$
$$p_{\downarrow\Rightarrow\uparrow}(x) = \nu \exp\{+(kx+h)\}.$$

この遷移確率中のパラメーターk, h, νは，以下の意味をもつ。

k：値が大きくなれば，遷移確率はxの値に影響されやすくなり，「周りの雰囲気に流されやすくなる」ことを表す。このパラメーターはスピン相互の影響度を表す。これは系の内的なパラメーターである。

h：値が大きくなれば，↓から↑へ変化する遷移確率は増加し，↑から↓へ変化する確率は減少する。このパラメーターは外的な影響を表している。

ν：遷移が起こる単位時間当たりの頻度を表している。

(1)式のxを連続変数とみなし，tを時間変数とし，確率分布関数を$f(x;t)$と表記すると，$f(x;t)$は次のフォッカー・プランク方程式に従う[3),4)]。

$$\frac{f(x;t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\{K_1(x)f(x;t)\} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\{K_2(x)f(x;t)\} \tag{2}$$

$$K_1(x) = \left(\frac{1}{2} - x\right)p_{\downarrow\Rightarrow\uparrow}(x) - \left(\frac{1}{2} + x\right)p_{\uparrow\Rightarrow\downarrow}(x)$$
$$= \nu\{\sinh(kx+h) - 2x\cosh(kx+h)\},$$
$$K_2(x) = \left(\frac{1}{n}\right)\left\{\left(\frac{1}{2} - x\right)p_{\downarrow\Rightarrow\uparrow}(x) - \left(\frac{1}{2} + x\right)p_{\uparrow\Rightarrow\downarrow}(x)\right\}$$
$$= \left(\frac{\nu}{n}\right)\{\cosh(kx+h) - 2x\sinh(kx+h)\}.$$

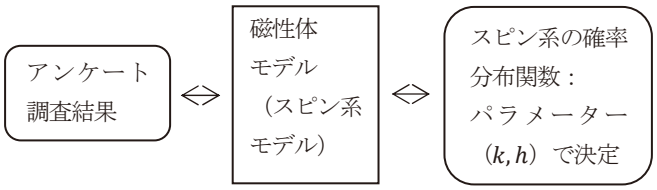
３．モデル計算による現実問題との対比

(2)式の定常解（定常分布）を$f_{st}(x;k,h)$とする。νは定常分布には現れない。パラメーターk, hを決定する方法として，確率分布関数と平均・分散との関係を利用する。xの平均値をμ_x，分散を${\sigma_x}^2$とすれば，確率論により，

$$\mu_x = \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} x f_{st}(x;k,h)dx, \tag{3}$$

$${\sigma_x}^2 = \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} x^2 f_{st}(x;k,h)dx - \left[\int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} x f_{st}(x;k,h)dx\right]^2 \tag{4}$$

と計算される。そこで，実測値から得られた数値を(3),(4)式左辺の$\mu_x, {\sigma_x}^2$として代入し，それらの値を再現するようなk, hの値を数値計算により求める。この方法で求めた二つのパラメーターk, hの値が，学級の状態を表現している可能性がある。



アンケート調査①～③を実施した時には，学級が定常状態に達していたと見なし，その平均値と分散を(3),(4)式に当てはめ，パラメーターを決定した。また，現実的な範囲でパラメーターを少しずつ変化させ，シミュレーションを行った。モデル計算と現実の状況を対比し，学級崩壊などの特異な現象がどのように発生するかなどの分析を行った。

引用文献

1) H.Haken: Synergetics, an Introduction, 2nd ed., Springer (1977) , 邦訳：「協同現象の数理」.
2) W.Weidlich: Physics Reports, 204-1 (1991) 1-163.
3) W.Weidlich: Brit. J. Math. Stat. Psychol. ,24(1971) 251-266.
4) W.Weidlich: Collective Phenomena,1 (1972) 51-59.

再考：ヤングの実験における単スリットの役割

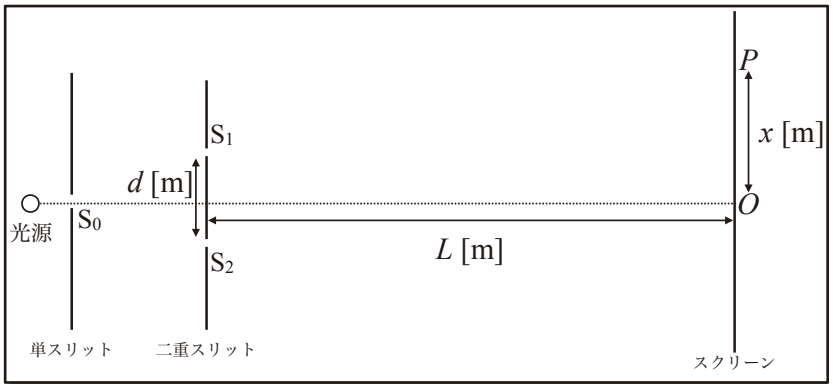
中央大学附属中学校・高等学校　　勝田 仁之
E-mail:　katsuda.phys.edu@gmail.com

本講演においては、ヤングの実験における単スリットの役割について再考し、またその高校教育における扱いについて問題提起を行う。

単スリットの役割について再考

通常、ヤングの実験における単スリットの役割は以下のように説明される。「光源から出てくる光は様々な振動状態のものが混ざり合っていて、そのまま二重スリットに入射しても干渉縞は観測できない。そこで、単スリットを通して位相のそろった光が二重スリットに入射するようにする。」さて、この説明で納得がいくだろうか？もうちょっと突っ込んだ質問を生徒からされたら、読者ならどう答えるだろうか。

もちろん、ヤングの実験における単スリットの必要性については疑う余地がない。実際、右図の実験状況において、単スリット S_0 を取り除いて光源から直接二重スリット $S_{1,2}$ に入射させると、スクリーン上に干渉縞は観測できない。教室においても、演示あるいは生徒実験によって容易に示すことができる。しかしながら、単スリットの必要性を示しただけでは「なぜ単スリットがあると干渉縞ができるのか」という点について説明したことにはならない。



ヤングの実験の状況

そこで本講演では、「もし、生徒にこう聞かれたらどう答えるか？」という形で以下に列挙した疑問について(時間の許す範囲で)再考していきたいと思う。ぜひ、読者も一緒に考えてみて欲しい。また、より良い説明や教材があれば、ぜひお知らせ願いたい。

・単スリットを通ると位相が揃うのならば、二重スリットの各スリットを通った光の位相も揃っているのではないですか？
・可視光の波長と比べるとスリットの幅は 1000 倍くらい広いのに、なぜ回折するのですか？
・そもそもどうして単スリットを通ると位相が揃うのですか？
（・単スリットだけでも回折が起こりますが・・・？）

高校教育での扱いについて問題提起

高校物理において、ヤングの実験を扱う目的は、いうまでもなく「光の波動性」のもっともらしさを高めることである。幾何光学のモデルでは説明できない現象に対し、波動光学のモデルで説明を与えることで、光の波動性を支持する根拠とするのである。また、ヤングの実験における干渉縞の幅が色によって異なることから、色と波長の関係に気づかせ、分光への動機付けを行うのである。

その見地に立ったとき、ヤングの実験に対する物理学の専門的見地に立った理解というのは、どの程度生徒に求めるべきだろうか。私は前節末に列挙した疑問に対し、高校生に物理学として正確な理解を与えることは、少なくとも通常の授業の中では無理があると思う。もちろん、教員が「この単元には通常よりも時間をかけて徹底的にやる」というのなら否定はしない。しかし、様々な学校の様々の生徒を対象として作られる、教科書・問題集・入試問題といったもので深く踏み込むのは避けるべきだと著者は考える。現状を調べてみると、単スリットの役割を問うものや、単スリットの幅の限界値、単スリット回折の定量的扱い、干渉における光の強度分布といった項目が取り上げられている。高校物理における教材「ヤングの実験」の位置付けを見失っているのではないだろうか。

おわりに

ヤングの実験に限らず、物理屋からすると高校物理では扱いが“ふわっと”していると感じられる教材というのはいくつもあるだろう。物理屋としては教えたくなってしまうところであるが、教材としての位置付けを鑑みて、そのままにしておくか、踏み込むなら徹底的に時間をかけてやるかにしておくべきだろう。中途半端に踏み込むことは避けるべきだ。著者としては、教員自身の理解は物理学として確固たるものでありながら、授業では“ふわっと”扱うということを目指す。

それにしても、単スリットの役割は「位相を揃えるため」というだけじゃ何の説明にもなっていないのに、説明されると「なるほど」と納得してしまう。理解というのは“ふわっと”した、不思議なものである。

参考文献

[1] Physical Science Study Committee：PSSC 物理 上 第２版, 岩波書店(1967)

[2] 遠山 武：ヤングの光の干渉実験における単スリットの幅の限界について, 物理教育 **26** 4(1978)

[3] 山田 茂夫：２スリットによる光の干渉縞の成立条件, 物理教育 **19** 4(1971)

NHK E テレ 高校講座ベーシックサイエンスを通して行う理科教育

東京理科大学　川村　康文

E-mail　yasufumikawamura1959@gmail.com

１．はじめに

NHK の E テレにおける 2016 年度の高校講座として，ベーシックサイエンスという番組が制作された。この科学番組に 1 年間にわたり，監修およびレギュラーとして出演をさせて頂き，この経験より得られた知見についてまとめたので報告する。

日本の青少年の科学離れについては，広く認識されているところである。特に，高等学校での物理離れについては，改善が難しいままの状況が続いている。若者の科学離れへの対処として，スーパーサイエンスハイスクールや科学の甲子園や物理オリンピックなどいろいろな方法が行われている。しかし，これらは，その年代層の科学に関心が高い高校生の学びの動機として機能しているが，もっと対象者を広げて，科学離れへの対策がなされる必要を，著者は強く感じているところである。波及効果が大きなものといえば，テレビ番組がある。お茶の間で科学啓発が実践されていけば，市民の科学リテラシー向上にやがてはつながるのではないかと期待している。

このようなことを受けて，テレビ番組を通しての科学啓発活動には，大きな意義があるのではと考えるようになった。このようなおりに，NHK の E テレ高校講座から，監修のオファーを頂いたので，前向きに取り組むことにさせて頂いた。

２．ベーシックサイエンスという番組

番組ベーシックサイエンスが目指すものは,「理科の第 1 分野とされてきた物理分野や化学分野の学習が嫌いという人に，おもに物理分野の学習の面白さを知ってもらい，物理基礎などの履修の動機につなげる」である。ベーシックサイエンスは，学習指導要領で決められた科目ではないので，この番組では準拠する教科書はない。したがって教える内容については，プロデューサーと一から詰めることとなった。1 つには，NHK での人気番組の大科学実験の映像を利用し，その内容を解説するという柱がたてられた。それを補完するように，著者の拙著である「理科教育法」（講談社，2014）から，大科学実験と同一テーマで実施できる実験を選び出し，これらのマッチングによって，1 年間の放送内容を概ね決定した。また米村でんじろう氏も，各学期に 1 回，年 3 回，実験ショーの形で出演することに決まった。

３．科学番組の監修者が行うこと

一般に，科学の内容を題材とした番組では，専門家を監修者としてたてることが行われる。監修者は，放送される内容が，科学的に正しいかどうかを，チェックしながら，あるいは，実験を安全に事故無く実施できるのかどうかのチェックを行うことになる。

このため監修者は，科学番組の台本の作成作業に相当長い時間付き合うことになる。場合によっては，台本作成の事前相談というかたちで，予備実験を含め，面接に多くの時間をさくことになる。かつて，オリンピック選手が，テレビ放映のために多くの時間がさかれるが，時間単価を計算した経費が必要だと発言されていたが，テレビ業界では，この部分では，謝礼等は発生しない。友人の何人かは，テレビ局からの依頼は一切受けないと語っているが，我々研究者は，普段でさえ時間に余裕が無

く忙しい状況にあるため，このようなことに多くの時間を費やすことが本来できない場合が多い。科学の専門家が，科学番組制作に協力する場合には，このような風土があること知っておくといいかも知れない。

良質な科学番組が制作されていくためには，映像制作のプロのテレビ局の関係者の方々と，科学の専門家ないしは，科学の内容に詳しい人材とが，うまく共同作業を行っていく必要があるが，科学の専門家にとっては，参加しにくいのが現状といわざるを得ない。今後，科学の専門家が，科学番組や科学教育番組に，負担を感じることなく参加できる環境の整備は重要であるといえよう。また，科学番組や科学教育番組の制作に携わりたい理科系出身の若者に，もっと門戸が開かれることによって，若いアイデアに満ちた良質のコンテンツが作られるようになる可能性が広がるといえよう。

４．番組に登場した東京理科大学川村研究室の実験教材

当研究室の実験教材で登場したものは多いが，その代表的なものとして，①クリップモーターカー，②慣性力実験機，③自転車発電機の３つをあげておきたい。それぞれ，使われ方が異なり，①のクリップモーターカーは，番組を通して全面に，②の慣性力実験機は，放送用にかなり変更されて利用された。③の自転車発電機は，大科学実験とのコラボという形で活用された。

クリップモーターカーは，第２回「モーターの仕組み」で取り上げられた。ベーシックサイエンスのプロデューサー，スタッフのみなさんが，川村ならこの実験！と選んで頂いた。クリップモーターは，小中高のそれぞれの段階で実験教材としてよく活用されるため，広く知られた実験となっている。しかし，そのために，回すのが難しいモーターと認識されている面もある。これを模型自動車にして走らせるというのは，かなり難易度の高い実験となる。このクリップモーターを用いて，たのしくサイエンスしようというのがこの回の放送である。

慣性力実験機は，第 47 回全日本教職員発明展（1997 年）で特別賞(内閣総理大臣賞)を受賞した実験機である。これを用いて，第 22 回「「着地」するのはどこ？～慣性の法則(1)～」と第 23 回「モノは動きたくない!?～慣性の法則(2)～」の放送を行った。ベーシックサイエンスでは，物理基礎につなぐ内容を学習するので，慣性力については扱わず，運動の第１法則（慣性の法則）の学習を楽しく行った。

第 40 回（最終回)「回転力で電気を起こせ！！～発電～」で登場した自転車発電については，当研究室で脈々と開発されてきた実験機である。大科学実験では，当研究室の自転車発電機ではないが，それらを用いてメリーゴーランドを稼働させている。

５．考察

NHK　Ｅテレ高校講座　ベーシックサイエンスという番組に出演し，その監修を行った。科学の伝え方やまた科学だけに限るのではなく教育啓発活動としての情報の伝え方を，著者自身が学べただけでなく，出演者や番組制作者とも，科学的な知識を共有できた。これらの知見は，これまでローカルルールとして，科学番組の制作に携わった方々の間では，脈々と受け継がれてきたことなのかも知れないが，その一部分でも，広く一般化することが重要であると考える。1 年間，レギュラーとして関わることにより，テレビ番組という方法論を用いて演示する実験教材の見え方についても，いくつか方法があることを紹介できた。今後，科学の専門家として，科学番組に関わっていこうとする方への知見となれば幸いである。また，この番組によって物理分野や化学分野の学習内容に興味をもってくれる高校生が増えることを期待したい。

日本各地の自然放射線測定の結果と分析及びGM管方式とシンチレーション方式の特性に関する考察～TEAMゆりかもめプロジェクトの一環として～

兵庫県立北須磨高等学校, 壷井宏泰
E-mail　gorogoro1412@yahoo.co.jp

１．はじめに

ＴＥＡＭゆりかもめプロジェクト（坂東昌子、角山雄一プロジェクトリーダー、JST 科学技術コミュニケーション推進事業問題解決型科学技術コミュニケーション支援「ネットワーク形成型」平成 28 年度採択事業）は中学生・高校生が自らの手で自然環境放射線の測定を行ないマッピングしていくプロジェクトである。そのメンバーとして、日本各地の放射線量を測定した結果、及びそこから得られた知見について報告する。また、人工放射線を線源として、ＧＭ管方式の測定器とシンチレーション方式の測定器の精度、レスポンス等について比較し、各測定器の特性についてまとめ、測定時の注意項について考察したものも合わせて報告する。

２．特性の比較実験（ラジウムセラミックボールを用いて）

ＴＥＡＭゆりかもめプロジェクトで使用する放射線測定器は、ギョロガイガーⅡ（株式会社ギョロマン製、GM 管方式）であり次のような特徴がある。

①測定値、位置、時刻の情報を Bluetooth でスマートフォンに転送し保存することが可能。

②マッピングソフトにデータを UP することにより、簡単にマッピングが可能。

以上の特長から、中高生でも簡単に測定・マッピングが可能である。しかし、この測定器の特長を正しく理解した上で測定する必要があり、RADI（HORIBA 製 PA-1000、シンチレーション方式）と比較してレスポンスや測定値の特長を調べた。

（実験１）二つの測定器から０、４、８、１２ｃｍ離れた場所にラジウムセラミックボールを設置、撤去を繰り返し、１０秒毎に測定し、レスポンスを調べた。

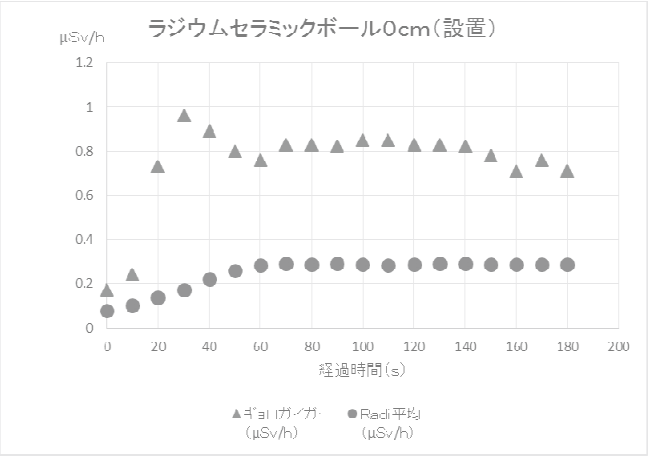


図１－１　０ｃｍに設置時のレスポンス

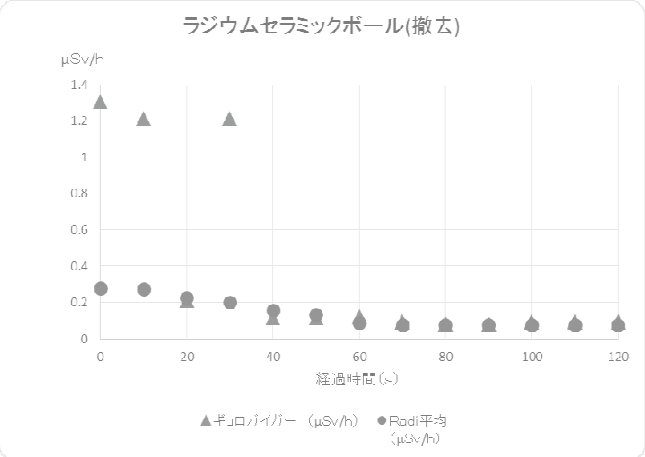


図１－２　０ｃｍから撤去時のレスポンス

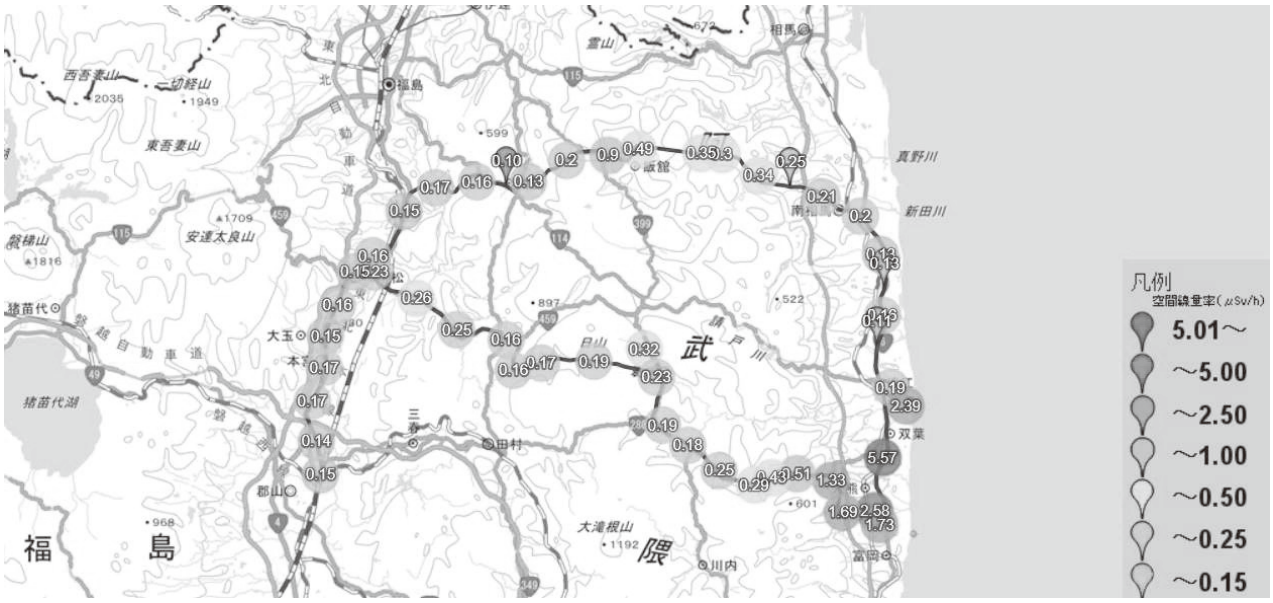
（考察 1）この実験から正しい測定値を得るためにはギョロガイガーで４０秒程度、RADI で６０秒程度必要であることがわかった。この違いは測定方式の違いや測定器のセンサー部分の面積、

移動平均の取り方等によるものと考えられる。新幹線や車に乗って高速で移動しながら測定する場合は、広範囲の放射線量の平均値は測定可能であるが、ホットスポット等の局所的な線量を測るためにはゆっくり歩いたり、一分程度静止したりして測定する必要があることがわかった。また、ギョロガイガーの方が高い測定値を示すことがわかった。これも測定方式の違いと Sv への変換方法の違いにあると考えられる。測定時には注意が必要である。

距離の違いによる実験結果からは線量が低いほどレスポンスが遅く、線量が高いほど測定値が不安定になること等が判明した。

３．福島県での測定

2017 年 6 月 19 日に福島県立安達高校と合同で福島県の放射線量を測定し、マッピングした。車で移動しながらの測定であったが、飯舘村、浪江、南相馬では下車して測定した。



①郡山や二本松では、神戸と変わらない線量であった。

②避難解除された飯舘村の汚染土仮置き場付近では、地面から１m程度の高さでは１μSv/h 以下であったが、除染されていなさそうな場所で地面付近を測定したところ数μSv/h であった。

③国道６号線の福島第一原発付近では最大で約８μSv/h であった。

４．最後に

生徒を引率して福島県を訪問し、福島県の高校生と共に原発被災地の放射線を測定しながら巡検した。お互いの意見交換の中で、福島県の高校生が「福島県という一括りで放射線量が高いとか危険とか思われていることがショックだったが、実際に福島県に来てくれて現状を知ってくれたことが嬉しかった」と感想を書いていたのが印象的だった。

中高生が放射線測定とマッピングを通じて放射線に興味を持ち、放射線について正しい知識を身に着けることはとても大切であると感じた。「正しく怖がる」という表現がよく使われるが、放射線について科学的に正しい知識を持ち、それに基づいた正しい判断ができる生徒を育成したいと強く感じた。

物質の三態変化と分子運動についての誤概念

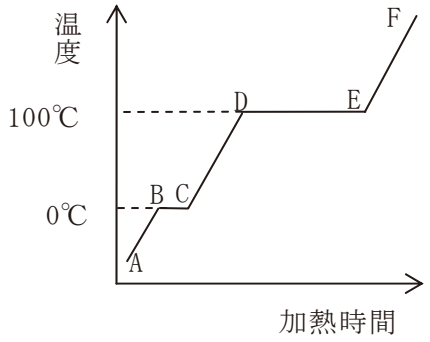
筑波大学附属高校，鈴木亨
E-mail　RXG01375@nifty.ne.jp

１．学生の誤概念

長年，教育実習生の指導や教職課程の授業を担当していると，理工系大学生でありながら，物理の基本的な事項についての理解ができていないことにつくづく悩まされる。標記の問題に気づいたのは，大学の理科教育法の授業内に行った，学生の模擬授業においてである。

ある学生が,「液体というのは固体よりも分子運動が激しい状態です」という説明をしていた。終了後に，「60℃の鉄と 40℃の水銀を比較したら？」と問うと，当の学生は「水銀です。分子運動が激しいから，流動するのです」と自信たっぷりに答える。では，両者を接触させたら熱伝導はどうなるか，と問うたら初めて首をひねり始めた。熱伝導は，分子同士の衝突で起こる。定性的には分子運動の激しい方から穏やかな方へ，分子運動のエネルギーの平均化の方向のはずである。

２．入試問題の解説から３．ＮＨＫの講座で



実は，こうした誤りは学生にとどまらないようなのである。少し以前になるが，旺文社の発行する「2008 大学入問題解説・化学」に前年度の埼玉大学の入試問題の解答・解説が出ている。

水を加熱しながら温度を測ると右図のようになる。そこで，

> （ｃ）同じ温度であるＤ点とＥ点において，この物質の「分子間の平均距離」と「分子の熱運動のエネルギー」をそれぞれ比較し，15 字程度で説明せよ。

とある。それに対する解答は以下になっている。

> 分子間の平均距離…液体のＤ点より気体のＥ点が大きい。
> 分子間（ママ）の熱運動のエネルギー…液体のＤ点より気体のＥ点が大きい。

沸騰の始まるＤ点では 100％液体である。Ｄ－Ｅ間は気液共存で，Ｅ点で 100％気体となる。Ｄ点でもＥ点でも温度計を接触させれば，100℃を示す。ということは，温度計を構成する物質が，100℃の水ないし，100℃の水蒸気とそれぞれ熱平衡に達するからである。熱平衡というのは，その物質の分子運動のエネルギーの平均値が等しくなることに他ならない。

出題者は心得ていて，あえて分子間の平均距離と分子の熱運動のエネルギーのそれぞれについて聞いているに違いない。解答作成者（化学の教員）は,「解答ミス」というより，理解できていないのだと想像される。

３．ＮＨＫの講座で

偶然，平日の昼間にテレビをつけたとき，Ｅテレ高校講座「化学基礎」に目が留まった。昨年のことであるが,「物質の三態」で，講師が気液固の違いを分子運動で説明していた。液体が形をもたず，器の形に広がるのを「分子運動が激しいから」とのことである。より高温の固体が形を保つのを，どう説明するのであろう。実は，当の講師が知己の高校教員であったので後日連絡してみた。ご本人は案の定，根本的に誤解をされており，何回かのやり取りでご理解いただけたようで,「善処する」とのことであった。

ところが，今年度，同じテーマの回を観たところ，他の高校教員の講師で映像は差し替えてあったが，基本的な説明は同様であった。さらに監修をしている大学教員に連絡したところ,「個々の回については担当者任せで目が行き届かなかった。映像は変えられない(ネット上で配信されている)が付属教材を差し替えたい」とのことであった。

４．教科書は

その大学教員によると，高等学校学習指導要領解説の「化学基礎」p. 53（イ）「熱運動と物質の三態について」では,「…ここでは，粒子の熱運動と粒子間に働く力との関係により，物質の状態変化が起こることを理解させることがねらいである。…」と明記されており，教科書の記述もそれに準拠している，とのこと。現行，５社が「化学基礎」の検定教科書を発行しており，本文は一見それに準拠しているようでもあるが，整理した図のキャプションなどでは誤解を生んでも仕方がない記述が散見される。たとえば,「気体　粒子の熱運動が激しく，粒子は空間を自由に飛び回っている」（東京書籍「改定化学基礎」）などである。

さらに学習指導要領解説の「物理基礎」では,「…原子や分子の熱運動と温度との関係を定性的に扱い,内部エネルギー,物質の三態及び関連して絶対温度(熱力学温度)に触れる。」とあり，分子運動との関連に触れるが結合状態についてはあいまいである。案の定,「物理基礎」の教科書は結合状態で説明しているのは２社で,「…物質の三態の違いと三態変化は，原子・分子の結びつき方で理解できる。」（実教出版「物理基礎改定版」）などとしているが，３社は分子運動の違いのみで説明しているか，そう取られてもおかしくない記述になっている。

気液固の三相の違いは，分子間の結合状態が本質なのであって，温度ではない。相図で見れば，等温で圧力を変化させれば相変化は起きる。等圧，例えば１気圧の環境下では，温度変化で相変化が起こり，その温度を融点，沸点と呼び，その前後で分子運動の激しさ（分子の運動エネルギーの平均値）は異なるが，それは温度が異なるからである。前述のように二相共存時を考えれば等しいはずである。

概念調査に関する評価法の再検討 —テスト理論の立場から—

東京学芸大学 新田英雄
E-mail　nitta@u-gakugei.ac.jp

生徒の持つ物理概念を調査するため，FCI を始めとする概念調査紙の利用が普及してきている。それらを利用して，正答率による生徒の物理概念獲得度や，Hake の規格化ゲインを用いた授業効果の評価が行われている。だが，これらの値は，科学的な測定という観点から見て，生徒の能力や授業効果を本当に表していると言えるのだろうか。

テスト[1)]によって私たちが測定したいのは，生徒の学力である。学力は構成概念（construct）であり，原理的に直接的に測定することはできない。したがって，ある方法で学力を数値化した場合，どのような根拠でその数値が学力を表しているのかを明らかにしなければならない。しかしながら，古典テスト理論ではそのような根拠を与えることは困難である。なぜならば，古典テスト理論は測定値がテストの真の得点とどれだけ近いかを示すことができるが，真値自体が何を表すかは理論の枠組外になるからである。古典テスト理論では，

- 項目困難度（item difficulty）
- 項目識別力（item discrimination）
- 信頼度（reliability）

というパラメタを扱う。項目困難度は通過率（正答率），項目識別力は項目の得点と総得点との相関係数（点点双列相関係数），信頼度は真の得点と測定された得点の分散の比であり，近似的にしか求まらない。Cronbach の α 係数がよく用いられる。

古典テスト理論の本質的な困難は，特定のテストにおける特定の集団の測定値を対象としていること，すなわちテストの特性と生徒の特性を分離できないことである。

この困難を乗り越えようとしたのが現代テスト理論で，生徒の学力とテストの難易度を独立かつ母集団に依らない形で求めようとする理論である。現代テスト理論は，項目応答理論（Item Response Theory, IRT）[2)]とほぼ同義である。IRT では，生徒の能力（ability，潜在特性値 latent trait とも呼ばれる）とテストの項目困難度（item difficulty）を分離する。テストのパラメタとしては他に項目識別度，当て推量度を導入することができ，パラメタの数に対応して，1 母数，2 母数，3 母数の IRT と呼ばれる。ただし，1 母数の IRT は数学者の Rasch が明快な導出を与えており，通常の IRT の 1 母数と数学的には同等でも背景となる科学的根拠や思想が異なることは注意すべきである。このことを強調するために，1 母数 IRT は Rasch モデルと呼ばれる場合が多い。

現代テスト理論を用いるメリットは多くあるが，例として，Hake の規格化ゲインが持つ困難を克服するゲインが導入できることを挙げておく。詳細は講演で述べる。その他，測定尺度の問題についても講演で述べる。

１）池田　央：テストの科学，日本文化科学社（1992）
２）豊田秀樹：項目反応理論（入門編），朝倉書店（2002）

Force Concept Inventory 解答時の視線運動
―統計的解析の試みとその国際比較―

北海道大学[1], Pedagogical University of Cracow[2], 大野栄三[1], Roman Rosiek[2], Miroslava Sajka[2],
下條暁司[1], 岩田みちる[1]
E-mail　eohno@edu.hokudai.ac.jp

１．はじめに

視線計測技術はさまざまな研究分野で使われており[1)]、教育研究の分野においても、視線計測技術を使った論文の数が毎年増加している。著者は、Force Concept Inventory の問題を解答している大学生の視線運動を計測してきた[2),3)]。大学生がもっている誤解（misconception）や問題解決の方略が、視線運動の解析結果にどのような形で現れるのかを明らかにすることが研究の目的である。

人文社会科学系の大学生を対象とした先行研究では、FCI の問題を解決する際の視線運動を、3 つの指標を用いて解析した。その結果は、大学生がある考え（それが誤解であっても）や一貫した解答方略をもっていることが 3 つの指標の値に現れることを示唆していた。本発表では、あらたな計測結果を加え、ノンパラメトリック検定を用いて大学生をグループに分けた結果を報告する。さらに、ポーランドの大学生を対象に行われた計測結果との比較を試みる。

２．方法

視線運動の計測には、日本では Tobii T120 eye-tracker を、ポーランドでは SMI 1250 Eye Tracker を使用した。実験に参加した大学生は 6 問の FCI 問題を解答した後に構造化インタビューを受けた。大学生の誤解や問題解決の方略については、インタビュー結果から可能な範囲で判断した。本発表の研究で解析に用いた指標は、注視継続時間の合計（total fixation duration）である。データ解析を行う際に、FCI の問題の 5 つの選択肢に対応した AOI_i（i = 1,…,5: Area Of Interest）を設定し（図 1)、各 AOI_i の注視継続時間の合計を調べた。

大学生ごとに得られた注視継続時間の合計の 5 個のデータ（5 つの AOI_i に対応）を使い、箱ひげ図（box plot）を作成した。大学生#J1 と#J2 に対して、p_i と r_i を AOI_i（i = 1,…,5）の注視継続時間の合計とする。p_i の大小関係が $p_2 > p_5 > p_3 > p_1 > p_4$ であり、r_i の大小関係が $r_4 > r_1 > r_2 > r_5 > r_3$ であるとする。大小関係 $x_{max} > x_{2nd} > x_{mid} > x_{4th} > x_{min}$ のある 5 個のデータに対して、$U = x_{2nd} + \frac{3}{2}(x_{2nd} - x_{4th})$ と $L = x_{4th} - \frac{3}{2}(x_{2nd} - x_{4th})$ を定義する。$\{p_i\}$ と $\{r_i\}$ をプロットした箱ひげ図が図 2 である。5 個のデータをプロットしたので、灰色の箱内の領域にはデータはない。プロットされるデータが U よりも大きな値となる場合か、L よりも小さな値となる場合は、箱から離れた外れ値（outlier）となり、グラフ上に黒点でプロットされる。

各大学生を 5 個のデータをもつ対象として捉え、5 個のデータは非正規分布に従うと仮定した。データ数の少なさが検定の力を著しく削ぐことは覚悟した上で、ノンパラメトリック検定を使って大学生をいくつかのグループへ分けることを試みた。検定には、Levene 検定と Kruskal-Wallis 検定を用いた。統計解析は、STATA14 を用いて行った。

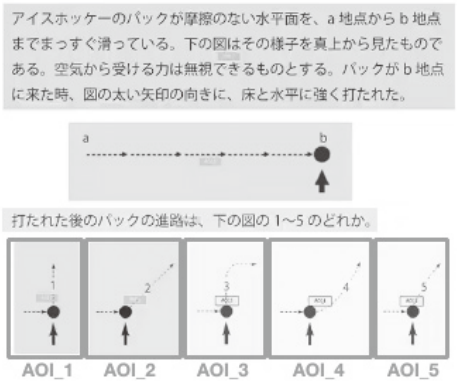


図 1. データ解析のための AOI_i（i=1, …, 5）

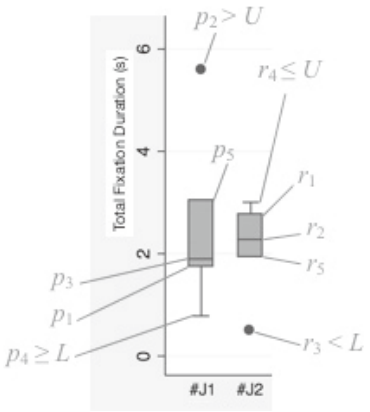


図 2. 箱ひげ図

3. 結果

人文社会科学系の日本人大学生 13 名とポーランド人大学生 10 名の結果をプロットした箱ひげ図が図 3 である。横軸は大学生 23 名の番号、縦軸は注視継続時間の合計である。左側が日本、右側がポーランドになる。各大学生に対して、注視継続時間の合計の 5 個のデータがプロットされている。大学生の選んだ選択肢に対応した AOI_i のデータを小さい円で囲み、3 つの指標が最大となっている場合をさらに大きな円で囲んだ。大学生が解答したのは、摩擦のない面上を等速直線運動しているホッケーパックが運動方向に直交する撃力を受けた後、どのような軌跡で運動するかを選択する問題であった。

インタビューから、日本人学生の 7 名が誤解や一貫した方略に基づいて解答していることがわかった。その内 6 名のデータが外れ値、1 名が上側近接値であった。このような特徴をもった日本人学生を、ノンパラメトリック検定を使って 2 つのグループに分けることができた。発表では、ポーランド人学生のデータに対する解析結果もあわせて報告する。

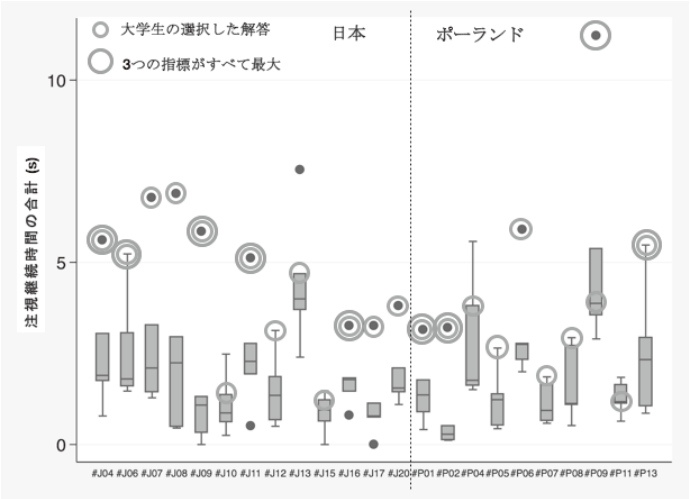


図 3. 注視継続時間の合計をプロットした箱ひげ

参考文献

1) eye-tracking 技術については、K. Holmqvist et al., *Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures*. Oxford; Tokyo: Oxford Univ. Press, 2011.

2) 大野栄三他、第 32 回物理教育研究大会原著講演、2015 年 8 月 8 日、日本物理教育学会

3) 大野栄三他、第 33 回物理教育研究大会原著講演、2016 年 8 月 6 日、日本物理教育学会

本研究は JSPS 科研費 17K00955 の助成を受けたものである。

熱概念に対する学生の理解の実態

ー「基礎物理学」、「物理講義実験」及び「理科教育論」受講生のアンケート調査から見えてきたこと－

東京理科大学　理学部　　五十嵐　靖則

igarashi-yasunori@nifty.com

1 はじめに

中学校、高等学校理科の教科書に見る熱概念に対する混乱は目に余るものがある[1)]。熱概念がどのように進化してきたか、英語圏のテキストを調査し報告した[2)]。今回は、学生が熱概念をどのように理解しているかを詳細に探るために選択肢を工夫して、調査を実施した。その結果は予想外で、物理教育の改善の必要性を強く感じさせるものである。

2 アンケート調査対象と調査項目

2017年の４月初めにＡ大学の１年生(工業化学の基礎物理学)と２年生(物理学科の講義実験)及び３年生(物理、化学、応用化学、応用物理、生物工学の各学科対象の理科教育論１)を対象に、次に示す質問項目を設定して「熱運動」「熱エネルギー」という言葉を　どのように理解をしているかを探るために質問紙法によるアンケート調査を実施した。　以下に調査に用いた質問紙の概要（依頼文は省略）を示す。調査対象の各学科の人数は、表１の中に示した。延べ人数は２９６名である。

１　「熱運動」という言葉について

「熱運動」という言葉を聞いたり、自分で使ったりしたことがありますか。該当する記号に○を付してください。複数回答可

ア 聞いたことがある　　イ 自分も使ったことがある　　ウ 聞いたことも、自分で使ったこともない

２　「熱運動」という言葉 を貴方は、どのように考えますか。次に示すものの中から正しいと考えるものを１つ選んでその記号に○を付してください。

ア 『物質を構成している原子や分子は、無秩序な運動をしている。原子や分子のこのような運動を熱運動しいい、この運動により熱が生まれる。』

イ 『物質を構成している原子や分子は、熱を持っていて、無秩序な運動をしている。原子や分子のこのような運動を熱運動という。』

ウ 『物質を構成している原子や分子は、熱によって無秩序な運動をしている。原子や分子のこのような運動を熱運動という。』

エ 『物質を構成している原子や分子は、熱量に応じて無秩序な運動をしている。物質が持つ熱の量に応じた原子や分子の運動を熱運動という。』

オ 『物質を構成している原子や分子は、温度に応じて無秩序な運動しているので、温度に応じた原子や分子の運動を熱運動と呼ぶのは、適切ではない。』

カ その他　（　　）

３　「熱エネルギー」という言葉について

「熱エネルギー」という言葉を聞いたり、自分で使ったりしたことがありますか。該当する記号に○を付してください。複数可

ア 聞いたことがある　　イ 自分も使ったことがある　　ウ 聞いたことも、自分で使ったこともない

４　「熱エネルギー」という言葉　を貴方は、どのように考えますか。次に示すものの中から正しいと考えるものを１つ選んでその記号に○を付してください。

ア『物質を構成している原子や分子は、熱によって無秩序な運動をしている。熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。』

イ『熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと』

ウ『物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。』

エ『物質を構成している原子や分子は、熱量に応じて無秩序な運動をしている。物質の持つ熱量に応じた無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。』

オ『内部エネルギーのうち、原子や分子の運動エネルギーと分子間の位置エネルギーの和を熱エネルギーという。』

カ 『物質を構成している原子や分子は、温度に応じて無秩序な運動をしているので、温度に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギー呼ぶのは適切ではない。』

キ その他　（　　）

3 調査の集計結果

表１　集　計　結　果　（２のカの その他 及び、４のキの その他 は、回答数が極めて少数のため紙面の都合で、記載は省略した。）

		工業化学科 基礎物理学 １４６名	物理学科 講義実験 ８２名	教職科目（理科教育論）（３年生） 物理、応用物理 ３２名	化学、応用化学 ２４名	生物工学 １２名	全体 ２９６名
１「熱運動」という言葉について	ア 聞いたことがある	112名 76.7%	62名 75.6%	24名 75.0%	18名 75.0%	11名 91.7%	227名 78.8%
	イ 自分で使ったことがある	49名 33.6%	27名 32.9%	14名 43.8%	9名 37.5%	5名 41.7%	104名 37.9%
	ウ 聞いたことも使ったこともない	11名 7.5%	7名 8.5%	1名 3.1%	1名 4.2%	0名 0%	20名 4.7%
２「熱運動」という言葉の理解	ア 原子や分子は無秩序な運動をしているこの運動により熱が生まれる	49名 33.6%	32名 39.0%	17名 53.1%	11名 45.8%	5名 41.7%	114名 42.6%
	イ 熱を持っていて無秩序な運動をしている。このような運動を熱運動という。	18名 12.3%	7名 8.5%	2名 6.3%	3名 12.5%	2名 16.7%	32名 11.3%
	ウ 熱によって無秩序な運動をしている。このような運動を熱運動という。	43名 29.5%	14名 17.1%	7名 21.9%	6名 25.0%	2名 16.7%	72名 22.0%
	エ 熱量に応じて無秩序な運動をしている。熱量に応じた運動を熱運動という。	30名 20.5%	28名 34.1%	6名 18.8%	3名 12.5%	3名 25.0%	70名 22.2%
	オ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	6名 4.1%	0名 0%	0名 0%	1名 4.2%	0名 0%	7名 1.7%
３「熱エネルギー」という言葉について	ア 聞いたことがある	118名 80.8%	64名 78.0%	25名 78.1%	18名 75.0%	10名 83.3%	235名 79.0%
	イ 自分で使ったことがある	42名 28.8%	29名 35.4%	14名 43.8%	10名 41.7%	6名 50.0%	101名 39.9%
	ウ 聞いたことも使ったこともない	9名 6.2%	4名 4.9%	1名 3.1%	1名 4.2%	0名 0%	15名 3.7%
４「熱エネルギー」	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	20名 13.7%	17名 20.7%	10名 31.3%	3名 12.5%	2名 16.7%	52名 19.0%
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	22名 15.1%	15名 18.3%	7名 21.9%	8名 33.3%	5名 41.7%	57名 26.1%

という言葉の理解	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	32名 21.9％	14名 17.1％	4名 12.5％	4名 16.7％	2名 16.7％	56名 17.0％
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	44名 30.1％	21名 25.6％	9名 28.1％	4名 16.7％	1名 8.3％	79名 21.8％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	17名 11.6％	9名 11.0％	2名 6.3％	3名 12.5％	1名 8.3％	32名 9.9％
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	9名 6.2％	3名 3.7％	0名 0％	1名 4.2％	1名 8.3％	14名 4.5％

4 調査結果の分析と考察 －「熱運動」と「熱エネルギー」という言葉の理解の分析と考察 －

表2 「熱運動」と「熱エネルギー」という言葉の理解(クロス集計) (その他の選択肢の記載を省略した為に、全体欄の％は表1と異なる。)

2「熱運動」という言葉の理解	4「熱エネルギー」という言葉の理解	工業化学科		物理学科		B・OB		K・OK		TB		全 体	
ア 原子や分子は無秩序な運動をしている。この運動により熱が生まれる。	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	7.5	名	9.8	名	18.8	名	4.2	名	16.7	名	11.4	名
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	6.8	49	11.0	32	15.6	17	20.8	11	8.3	5	12.5	114
	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	2.7		9.8		3.1		4.2		0		4.0	
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	8.2	％	3.7	％	12.5	％	4.2	％	0	％	5.7	％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	6.2	33.6	2.4	39.0	3.1	53.1	4.2	45.8	8.3	41.7	4.8	41.5
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	0.7		2.4		0		4.2		8.3		3.1	
イ 熱を持っていて無秩序な運動をしている。このような運動を熱運動という。	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	0.7	名	3.7	名	3.1	名	0	名	0	名	1.5	名
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	1.4	18	2.4	7	0	2	0	3	8.3	2	2.4	32
	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	6.2		0		0		8.3		8.3		4.6	
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	2.7	％	2.4	％	3.1	％	4.2	％	0	％	2.5	％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	0.7	12.3	0	8.5	0	6.3	0	12.5	0	16.7	0.1	11.2
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので、熱運動と呼ぶのは適切でない。	0.7		0		0		0		0		0.1	
ウ 熱によって無秩序な運動をしている。このような運動を熱運動という。	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	4.1	名	4.9	名	6.3	名	4.2	名	0	名	3.9	名
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	5.5	43	2.4	14	0	7	8.3	6	8.3	2	4.9	72
	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	8.9		4.9		6.3		4.2		8.3		6.5	
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	8.2	％	2.4	％	6.3	％	0	％	0	％	3.4	％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	2.1	29.5	1.2	17.1	3.1	21.9	8.3	25.0	0	16.7	2.9	21.7
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	0.7		0		0		0		0		0.1	
エ 熱量に応じて無秩序な運動をしている。熱量に応じた運動を熱運動という。	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	1.4	名	2.4	名	3.1	名	4.2	名	0	名	2.2	名
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	1.4	30	2.4	28	6.3	6	4.2	3	16.7	3	6.2	70
	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	4.1		2.4		3.1		0		0		1.9	
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	9.6	％	17.1	％	6.3	％	4.2	％	8.3	％	9.1	％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	2.1	20.5	7.3	34.1	0	18.8	0	12.5	0	25.0	1.9	22.0
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	2.1		1.2		0		0		0		0.7	
オ 温度に応じて無秩序な運動をしているので、熱運動と呼ぶのは適切ではない。	ア 熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。	0	名	0	名	0	名	0	名	0	名	0	名
	イ 熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。	0	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	7
	ウ 物質が持つ熱のエネルギーを熱エネルギーという。	0		0		0		0		0		0	
	エ 物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという	1.4	％	0	％	0	％	4.2	％	0	％	1.1	％
	オ 内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーと分子間位置エネルギーの和	0.7	4.1	0	0	0	0	0	4.2	0	0	0.1	1.6
	カ 温度に応じて無秩序な運動をしているので 熱運動と呼ぶのは適切でない。	2.1		0		0		0		0		0.4	

(1) 「熱運動」について: 表1から、どの学科の学生も アの「原子や分子は無秩序な運動をしている。この運動により熱が生まれる。」が最も多く、1年生の工業化学(33.6%)、2年生の物理(39.0%)、以下3年生の、B・OB(53.1%)、K・OK(45.8%)、TB(41.7%)で、学年が上がるにつれて増加傾向にある。2番目に多いのは、ウの「熱によって無秩序な運動をしている。このような運動を熱運動という。」が、工業化学、3年生の B・OB、K・OK。2年生の物理と3年生の TB は、エの「熱量に応じて無秩序な運動をしている。熱量に応じた運動を熱運動という。」である。アとイは旧い時代の熱の分子運動論そのものである[3)]。

(2) 「熱エネルギー」について: 表1から、学科により異なる。最も多いのは、工業化学と物理では、エの「物質が持つ熱の量に応じた無秩序な運動エネルギーを熱エネルギーという。」である。3年生のK・OK と TB は、イの「熱はエネルギーの一形態なので、熱あるいは熱量のこと。」で、物理は アの「熱による無秩序な運動のエネルギーを熱エネルギーという。」である。

このように、「熱エネルギー」という言葉については、学科を超えて理解が異なっている(混乱している)ことが分る。

(3) 英語圏に見る熱概念の変遷と進化について:熱運動や熱エネルギーなど誤概念を誘発する用語の使用は避けられている[2、4)]。

5 参考文献

1) 五十嵐 靖則 中学・高校教科書に見る「熱」と「熱エネルギー」の用語の混乱について 日本物理教育学会第30回物理教育発表予稿集(2013)50-51

2) 五十嵐 靖則 英語圏に見る熱概念の変遷と進化 日本物理教育学会 第32回物理教育発表予稿集(2015)107-108

3) R.Clausius The Mechanical Theory of Heat (1864) の Author's Preface で、『...I have formed of the molecular motions which we call heat.』と記されている。

4) 五十嵐 靖則 熱概念の進化と日本の理科・物理教育の今後の在り方について 東京理科大学 教職教育研究 No.1 (2017.3)111-120

「科学館大好きクラブ」14 年の成果と課題

大阪教育大学附属高等学校池田校舎, 筒井和幸[1]　大阪教育大学附属天王寺中学校, 廣瀬明浩[2]
ktsutsui@cc.osaka-kyoiku.ac.jp[1]　hirose@cc.osaka-kyoiku.ac.jp[2]

１．はじめに

大阪市立科学館を活用した中学生･高校生･大学生による自主的な科学的探究活動を始めて，今年で 14 年となる。この間に，活動の主体である「科学館大好きクラブ（KDC)」には 270 名を超える学生が参加し，研究成果発表の機会である「自然科学の基礎を訪ねる」は，季節のイベントとして科学館を訪れる一般市民の方々に親しまれるようになった。本発表では，活動の特徴や参加した学生の活躍・成長例を紹介するとともに，日頃，学校で物理（理科）教育に携わる者がこの実践研究から得た成果と，今後の課題について報告する。

２．活動開始の経緯

1992 年に始まった「青少年のための科学の祭典大阪大会」は大規模なイベントへと発展したが，来場者に中学生・高校生が少ないという課題があった。そこで，学校の部活動や探究活動の成果発表の機会として出展することを奨励したところ，出展者の立場を経験した中学生・高校生が科学的な面で力をつけるだけでなく，人間的にも成長することが確認された。そこで，2005 年の世界物理年に向けて，大阪市立科学館の高橋憲明館長（当時）の発案を基に，新しい形の科学教育として本活動を企画し，2004 年から試行的に実施することになった。

３．活動の特徴

活動開始以来，参加している学生数等によって細かい点では多少の変動はあるものの，活動の骨格として常に重視していることは，次の 4 点に集約できる。

(1) 展示物についての科学的探究

大阪市立科学館には工夫された興味深い展示物が多数ある。しかし，来場者の多くを占める小学校低学年以下の子どもには，内容的に難しいものも少なくない。また，科学の基礎的な原理と日常生活との関係も，展示物を一見しただけではわからない。そこで，学生は数人で一つの班を構成して，展示物を子どもにもわかりやすく解説することに取り組む。

会合では，各班で検討した解説の方針や方法を発表して全体で議論するが，経験豊富な社会人や学生から「結局，伝えたいことは何か」,「知らない言葉を教えるのが目的ではない」といった厳しいコメントや，経験に基づくアドバイスが行われる。これにより，中・高生も徐々に科学的内容についての理解が深まり，解説の展開や小道具の使い方などが工夫されていく。

(2) 記念品等の創作活動

用意した展示解説を全て聞いてくれた子どもには記念品を渡している。これは，子どもが家庭で安全に工作できるキットで，作り方や仕組みを書いたプリントを添付している。1 個 100 円以内の材料費でできるものを，毎年全員で考えて用意する。様々な情報をヒントに自分たちでデザインし，材料を集め，下準備することは，多くの点で学生の成長に役立っている。

(3) 会合・イベントの自律的運営

「科学館大好きクラブ」と外部機関との関係に関しては筆者らが責任を持っているが，クラブ内部の運営は，主として大学生に任されている。毎回の会合の進行計画を考えたレジメの作成や会計，各種の製作物の準備や備品管理，次に述べる自己評価活動まで，大学生が中心となって役割分担し，高校生・中学生にもできる範囲で協力してもらう体制となっている。

展示物解説だけでなく，組織運営に関わる経験をすることは学生には大変有意義で，個人としての自立性と全体を見る視野の広さが育成される。

(4) 自己評価活動

イベントの際には来館者アンケートとスタッフアンケートを実施し，それらをまとめた自己評価活動を行っている。これは活動報告書としてまとめられ，大阪市立科学館研究報告に収められている。自分たちの解説が来館者にどのように伝わったのかを確認することは，組織の自律性を保つ上で不可欠なことである。また，毎年少しずつ学生が入れ替わるため，データを基に定期的に反省会を行うことは，全体の共通理解を深める上で貴重な機会となっている。

4．参加した学生の成長

高校生の中には，AO 入試や推薦入試で活動の成果が評価されて進学した者もいる。大学生の場合，就職試験の面接で KDC での活動を熱く語り評価された者もいる。学生と向き合い対話すると，KDC での活動が人格的な成長に大きく寄与していることを理解して頂けるようだ。

14 年間の活動の中で，学位をとり研究職に就いた者も複数いる。企業で技術開発に携わる者，科学館の学芸員，初等・中等教育教員（10 名）など，有為な人材を多数輩出している。

5．活動の成果

活動の成果として最も重要なことは，我々活動を見守る者が，「科学的な探究活動・創作活動とコミュニケーションを大切にした組織運営の経験」が青少年を人間的に大きく成長させることを確信した，ということである。学校教育で探究活動が重視されるようになった今，我々の経験や実践は多くの教育現場で参考になると考えている。

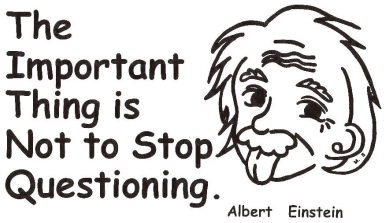
6．今後の課題

近年，SSH（スーパーサイエンスハイスクール）や GSC（グローバルサイエンスキャンパス）など，高校や大学で課題研究に取り組む機会が増加したことの影響もあり，筆者らの勤務校の生徒も KDC に参加しにくくなっている。今後は KDC で育った教員が勤務先での探究活動，部活動の指導の中で，自らの経験を生かしてくれることを期待している。その成果が KDC に還元されるようになれば，今後もさらなる発展が期待できると考えている。

参考文献・参考 URL

N. Takahashi et al. Proc. ICPE2006, p.329, A. Hirose et al., ibid. p. 361, K. Tsutsui et al., ibid. p. 363.

科学館大好きクラブ　http://www2.hamajima.co.jp/~fhert



未履修クラスでの物理学概論(Ⅱ)

九州大学基幹教育院，　副島雄児[1], 小島健太郎[2]
E-mail　okosoe@artsci.kyushu-u.ac.jp[1], kojima@artsci.kyushu-u.ac.jp[2]

１．はじめに

九州大学の基幹教育科目（1年次に履修する全学教育科目）では理系学部学生を対象とした「基幹物理ＩＡ・ＩＢ」が開講され，高校で物理学を十分に履修していない学生を対象とした“未履修クラス”では，これに代えて「物理学概論A・B」を開設している．「物理学概論A」は1年前期開講の力学,「物理学概論B」は1年後期開講の熱力学・電磁気学を扱っている．

筆者（副島）は，平成26・27年度に「物理学概論B」担当にあたって，教科書を指定しその内容を講義する通常の講義形式に代えて，60名程度の受講生を5～6名の班に分け，班学習を中心とした講義形式を実施した．この講義方法の妥当性や効果と欠点を調べるために，平成27年度の受講生に対するアンケート調査を実施し，その結果について報告した．[1]アンケートの結果から，講義の実施方法や受講生の班活動の方法などについて改善すべき点が見出されたため，平成28年度の同講義ではいくつかの改善を試みた．その結果を報告する．

２．講義方法

平成28年度の受講生は農学部の学生69名であった．学生には，講義外での班学習が必要なので，普段連絡を取り易い仲の良い者同士で11班に分かれるように指示し，この結果5～8名からなる班に分かれた．以降の講義では班ごとに固まって着席することとし，表1に示すような活動を行う予定であることを説明した．

表1　講義計画

週	講　義　内　容	班活動
1	講義説明・導入講義	
2	熱力学講義・班課題指定	
3	班学習	課題取組
4/5	課題発表会（6発表・5発表）	課題発表
6	熱力学試験	
7	電磁気学講義1・班課題指定	
8	班学習	課題取組
9/10	課題発表会（6発表・5発表）	課題発表
11	電磁気学講義2・班課題指定	
	班学習（冬休み中）	課題取組
12/13	課題発表会（6発表・5発表）	課題発表
14	電磁気学試験	
15	成績通知・まとめ	

第2週は，教師が熱力学の全体的な講義（第一法則，第二法則）を行い，講義中に班ごとの課題（調べて発表すべき問題）を指定する．翌第3週には班活動の時間をとって調べ学習を行うが，不足分については時間外に班員が集まって学習を補い発表の準備を行う必要がある．第4週では奇数班発表（6発表），第5週では偶数班発表（5発表）を行い，受講生同士が学び合う場とした．

電磁気学についても同様の形式で取り組み，前半は静電磁気（第7週～第10週），後半は電磁誘導・電磁波（第11週～第13週）を扱う内容とした．

３．課題と改善点

平成26・27年度のアンケート結果から次の点が見出された．

・講義形式は未履修クラスに受け入れ易かった
・授業の満足度は，授業の取り組みやすさ，難易度感にも依存している
・授業の理解度は，教師が行う講義の有用性の認識と関係し，班活動の状況には依存しない

・班学習が良好でないケースでは授業の全体的な満足度に強く影響を与えている
・班学習の良好さは，授業への取り組みやすさ，班学習での責任感や班の協力関係に影響を与えている

これらの結果は次のような課題を示唆している．

・班活動の方法を改善すべき
・班活動が個々の学生の理解度の向上につながる工夫が必要
・班活動の状況を調査し改善の方法を探る

4．アンケート結果

講義の最終週（第 15 週）はこの講義に関するアンケート調査を実施した．アンケートの設問は表 2 の通りで，[1. 全くそう思わない，2. あまりそう思わない, 3. どちらでもない, 4. そう思う，5. 強くそう思う]の 5 件法である．（設問 9 と 14 は逆転項目になっているので注意されたい.）

表2　アンケート設問

1	レポート作成と説明を行う形式は取り組みやすかった
2	レポート作成と説明を行う形式は，テキストを用いて解説と説明を行う形式の講義に比べて，理解を深めるのに役立った
3	他の授業に比べ授業時間外に行う学習時間は多かった
4	レポート学習前の講師によるまとめ講義は役に立った
5	班は班学習を行うのに適した人数だった
6	授業時間外の班学習は全員協力して行った
7	班学習で，自分自身の学習に責任感が生まれた
8	班学習の課題の回数は適切だった
9	授業時間外に集まりにくいなど班学習に支障があった
10	まとめ講義の内容は適切な難易度だった
11	レポート学習の課題は適切な難易度だった
12	熱力学とは何か，基礎概念が習得できた
13	電磁気学とは何か，基礎概念が習得できた
14	厳密さや計算を重視した内容の方が理解が深まる
15	総合的にこの授業に満足している

アンケート結果の一例として，図1に平成27年度，図2に平成28年度の「9. 班学習支障度」と他の設問との相関を示した．

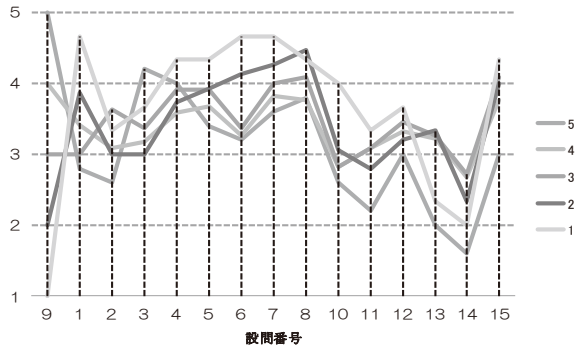


図 1　平成 27 年度調査の班学習支障度と他項目との相関

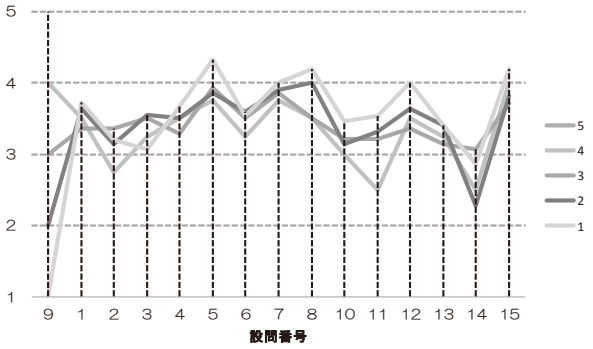


図 2　平成 28 年度調査の班学習支障度と他項目との相関

平成28年度の講義では，班活動の基本的な実施方法[2]に基づいて，講義の初めや途中で班活動に対する注意点の指導を行い，班活動状況聴取を行った．また，班学習における役割分担や，学生個々の分担が極端に偏らないような指導を行いながら講義を進めた．この結果，「班活動に強く支障があった」という回答（回答値5）は消失し，回答値4（やや支障があった）についても前前年の22名から4名に大きく減少していた．発表では，両調査結果を比較しながら分析を紹介し，平成28年度に実施した改善が効果を挙げたか否かを検証する．

参考文献

[1]　副島雄児、小島健太郎、第 33 回物理教育研究大会原著講演、1－a1、6. Aug. 2016（新潟）
[2]　金長正彦、第 33 回物理教育研究大会ワークショップ（協同的グループ問題解決法）7. Aug. 2016（新潟）

大学初年度におけるILDs「ニュートンの第3法則」の試み

広島大学大学院教育学研究科，梅田貴士
E-mail　tumeda@hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

近年の物理教育研究の成果の1つとして、相互作用型演示実験講義（ILDs）がある[1]。ILDsとはD.R. SokoloffとR.K Thorntonらによって開発された教授法で、ワークシートや演示実験、ディスカッションを取り入れた授業の展開によって効果が得られることが評価されている。ILDsは演示実験をメインとした方法であり、多数の実験道具や特殊な教室を必要とせずに少～大人数授業にも対応でき、部分的な導入も可能であるという汎用性の高さが特徴である。大学の物理教育におけるアクティブラーニングの実現を目的として、大学初年度の授業においてILDsを行っている。昨年度の「運動学2」に加えて、本年度は「ニュートンの第3法則」を試行したので、その結果について報告する。

2. ILDs試行の概要

ILDsを試みたのは国立大学教員養成系学部の1年生後期（第4ターム）の力学入門の授業（90分授業で全15回）で、受講者数は38名。評価の為にFMCE[2]によるプレ、ポストテストを行った。プレテストの結果から、「作用反作用に関する問題」の正答率が比較的低かった為、この内容に関する単元としてILDsの「ニュートンの第3法則」、さらに昨年度試行した「運動学2」を選び、それぞれ90分授業として2回分実施した。

授業では議論を行ってもらう為に3名の班を作った。FMCEプレテストが好成績だった学生を各班に1名配置して、あとの2名はランダムに振り分けた。授業の進め方は基本的にILDsのテキスト[1]に従った。

3. FMCEによるプレポストテストの結果

プレテストは授業の第1週で、ILDsの試行授業は第6回目と第7回目の授業で行い、ポストテストは約1ヶ月後に行った。受講者数は38名であったが、試行授業を受講し、プレ、ポストテストを両方回答した学生は32名であった。以下、この32名に対する結果を紹介する。プレ、ポストテストの解析結果は図1にまとめられている。FMCEの解析はWebで限定公開[3]されているテンプレートを使用した。FMCEの全47問のうち、不適切な7問を除外して、3問一括の問題が3つあり、全部で34問37点満点と、エネルギーに関する4問を除いた30問33点満点の2種類で採点されている。また、Smith & Wittmann[4]らによって改訂されたクラスター毎の結果も示されている。それぞれのクラスターがどの問題に対応するかは表1にまとめてある。ゲイン(Gain)は規格化ゲインである。

4. ILDs「ニュートンの第3法則」を試行してみて

今回の試行ではILDsのテキスト[1]に忠実に授業を進めてみて、洗練された演示実験の流れや、センサーを用いた力の可視化の有効性を実感できた一方で、様々な課題も見えてきた。演示実験

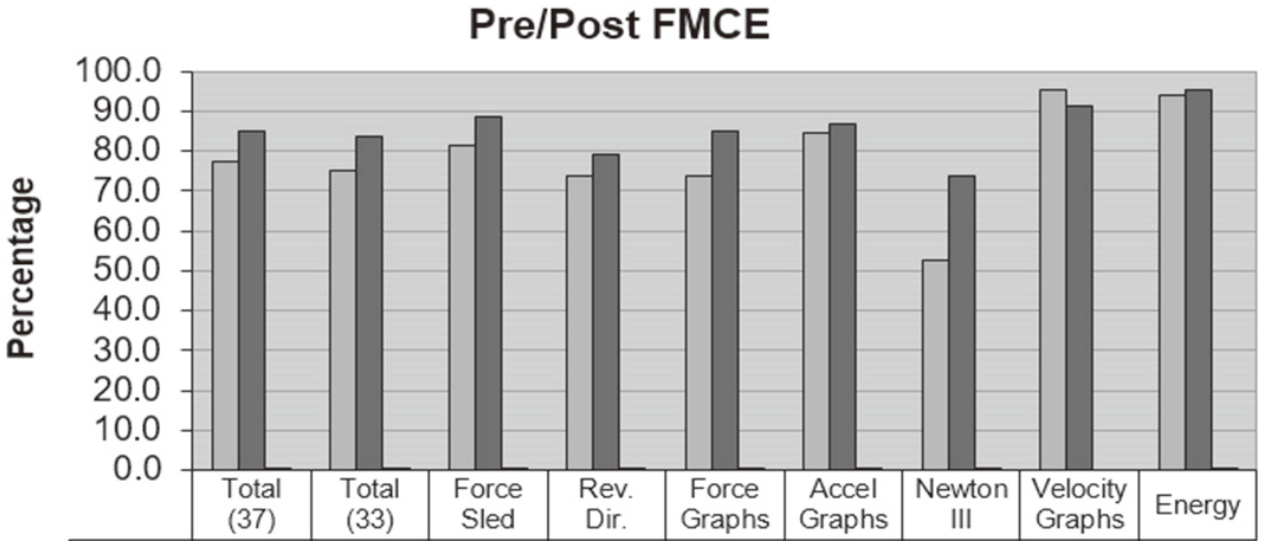


図 1：FMCE プレポストテストの解析結果。クラスターの詳細は表 1 と本文を参照。

クラスター（改訂版）	対応する問題の概要	対応する問題番号
Force Sled	そりに働く力	1-4,7
Rev. Dir.	斜面台車、コイン力、コイン加速度	8-13,27-29
Force Graphs	力と速度グラフ	14,16-21
Accel Graphs	加速度グラフ	22-26
Newton Ⅲ	トラック車衝突、トラック車押す	30-32,34,36,38
Velocity Graphs	速度グラフ	40-43
Energy	エネルギー	44-47

表 1：クラスター（改訂版）[4]に対応する問題番号とその概要

1～3 では作用反作用の力の関係と、物体に働く力の釣り合いを考えさせる問題が交互に続くが、両者を混同させないための工夫が必要であると感じられた。また、作用と反作用は力センサーで可視化できるが、摩擦力の可視化が出来ていないために、力の釣り合いとの違いについて印象づけることが難しいと感じられた。

4. 結果の考察

今回 ILDs の「運動学 2」と「ニュートンの第 3 法則」を行った結果、全体としてはゲインが 0.33 となった。今回の「ニュートンの第 3 法則」に関するクラスターである「NewtonⅢ」のゲインは 0.45 となった。「運動学 2」と「ニュートンの第 3 法則」に関連するクラスターに関しては概ね良好なゲインが得られたが、昨年度の試行と比べて、「Rev.Dir.」と「Accel Graphs」のゲインが下がっている。ただしプレテストの段階で正答率が 70%を超える集団であり受講者数も多くないため、定量的な議論をするにはさらなるデータの蓄積が必要である。

[1] D.R. Sokoloff and R.K. Thornton, Phys. Teach. 35, 340-347 (1997).
[2] R.K. Thornton and D.R. Sokoloff, Am. J. Phys. 66(4), 228-351 (1998).
[3] PhysPort, https://www.physport.org/.
[4] T.I. Smith and M.C. Wittmann, Phys. Rev. ST-PER 4, 020101 (2008).

天秤と輪軸で腰痛予防を教える
—1 単位看護物理学での力学教育の試み—

松本大学総合経営学部[1]，室谷　心[1]
E-mail　muroya@matsu.ac.jp[1]

１．看護物理学

準看護師に対して看護士受験資格を与える看護専門学校で，1 単位 90 分 7 回の看護物理学という授業を担当している．看護師に知っていて欲しい物理は多岐にわたるが,回数も限られているので,力学に話を絞り，大きさを持った物体の力学の理解を目指している．

現在，講義の目標としているのは，図 1 で a)と b)の違いの理解である．看護師は患者を支えたりタンカを持ったりして，重たいものを支えることが多く，腰痛にならない工夫は現場で重要である．

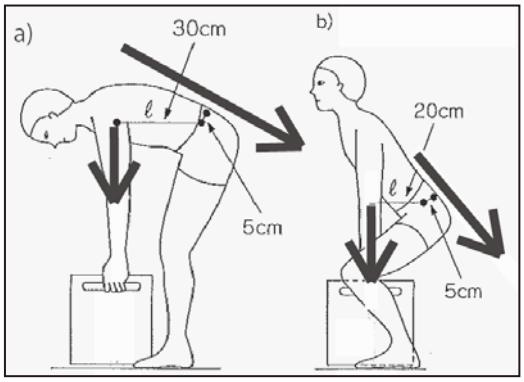


図 1　文献[１]より一部加筆

腰痛にならないための，重たいものを持つ際の心がけとしては,「顔を上げる」「背筋を伸ばす」「ひざを曲げる」といった現象論的な心がけが説明されることが多いが[2],物理担当者としては，力学の理解から腰痛にならない適切な姿勢を取れるようになって欲しいと考えている．

２．必要な物理と生徒の既習知識

図 1 の現象の物理として教えなければならないことは，力のモーメントであり，特におもりから人体への力と背筋の力の方向が平行でない点が扱いを難しくする．学生は全員准看護師であるが，準看護師は高校卒業を前提とはしていないので，義務課程以外の知識は前提とすることはできない．実際には多くの方が高卒以上ではあるが，本校では学校卒業後 10 年以上たった社会人が多いので，高校で習ったであろう知識もあまり期待できない．そこで，全員が知っている知識として，天秤の知識から話を組み立てることにした．

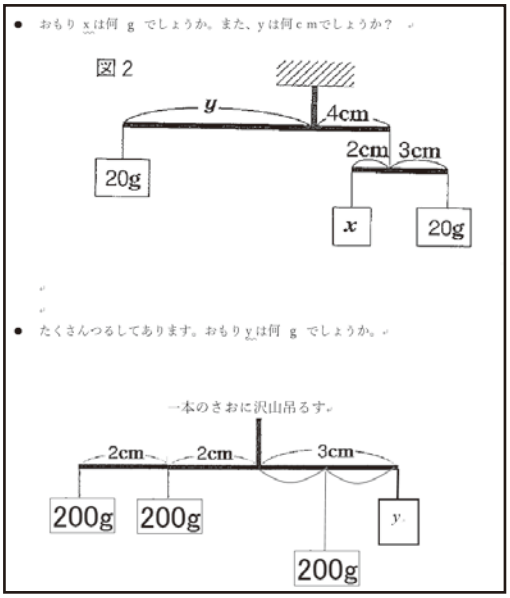


図 2　予習プリントの例

３．授業の組立て

まず，毎回簡単な問題を宿題として課し，既習知識の想起を促すとともに，事前知識の把握を試みた（図 2)．予習プリントの正答率からみて，天秤の「おもりの重さと腕の長さが逆比になる」という知識は良く定着している．その一方で逆比という 2 体問題に特化した知識になっており，図 2 の下のように重りの数を増やすと，正答率は大幅に低下する．

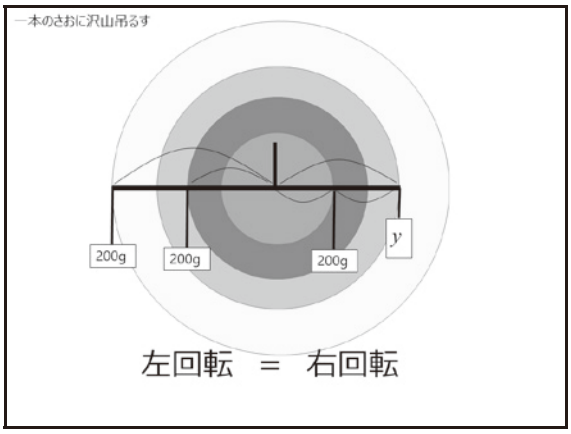


図 3　図 2 下図を輪軸で解説

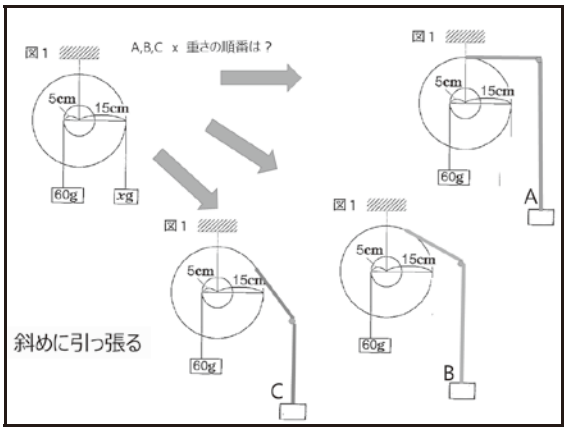


図 4　斜めに働く力のモーメント

そこで輪軸の活用である．輪軸の場合糸のつながっている輪の半径がさまざまあっても，右回りか左回りのどちらかの回転に寄与するので，自然な形で力のモーメントの和を導入することができる（図 3）．さらに輪軸の一方の糸を斜め方向に誘導することによって，力の矢印を接線とする円の半径が重要であることを見せることができる（図 4）．

4．人体への応用

図 1 で重りによる力のモーメントと背筋による力のモーメントを議論するためには，力をベクトルとし，回転方向と軸方向の 2 成分に分けるのが正攻法であろうが，本講義では輪軸を用いて，力の矢印を接線とする円を描き，半径が天秤の軸に相当するとした．

姿勢の違いによる背筋への影響の演示用器具が図 5 である．図 5 で a)と b)，c)と d)の違いは，重りを鉛直に下げた普通の天秤と背すじに沿った背筋の違いであり，b)と d)の違いが姿勢の違いである．背筋のようにバー方向に引くようにするとバーの角度によって，ばねの伸びが大きく変わってくる．このばねの伸びが背筋にかかる負担である．b)と d)の，ばねの伸びの明らかな違いは学生に強い印象を与える．この器具では，おもりと比べてバーの重さが無視できなことと，背筋と支点との間の距離を稼ぐために支点が下に飛び出していることにより，a)と c)のように，鉛直下向きに引いてもバーの傾きによってばねの伸びに違いが出ることが気になるが、a)や c）の状況が人体で実現されるわけではない．あくまで b)と d)が人体のモデルである。

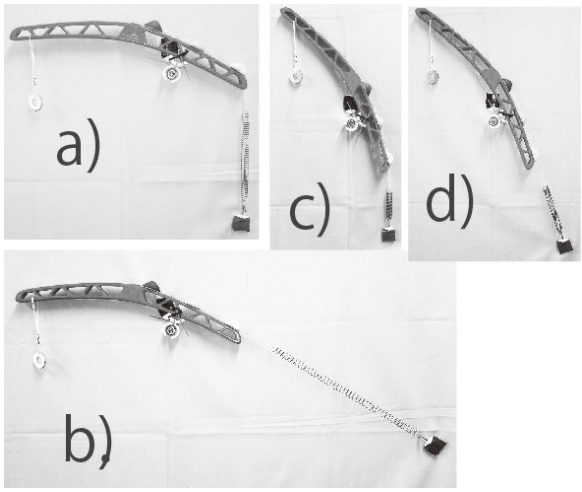


図 5　姿勢の違いによる背筋への負担

現在義務教育では輪軸は扱われていないようであるが，大きさを持った物体，特に基礎的段階での人体の力学的理解に有効と思われるので，輪軸の活用を提案したい．

参考文献

[1]健康運動指導士養成講習会テキスト，財団法人健康・体力づくり事業財団
[2]救急現場のバイオメカニクス，田中秀治監修，壮道社(2010)

手回し発電機の手応えと電力におけるｐプリムズ

福井大学大学院[1]，福井大学大学院教育学研究科[2]，山本修平[1]，小林和雄[2a]，山田吉英[2b]
E-mail　fukui_rika2@yahoo.co.jp[1], kobaykk@u-fukui.ac.jp[2a], yamada-y@u-fukui.ac.jp[2b]

１．問題の所在

1980 年代、学習者が授業などの学習場面に持ち込む誤概念の影響とその克服に関する議論において、誤概念という概念は「素朴で強固な誤った信念」と表象される傾向にあった[1]。「概念変容」「概念転換」(concept change)といった表現には、修正されるべき誤りのニュアンスが伴う。しかし脳の働きを情報処理プロセスとしてモデル化する認知科学の立場では、誤概念という構成概念は収まりが悪い。diSessa は物理現象やそれに関する問題の表象をもたらす要素的なスキーマとして、現象論的プリミティブズ(以後ｐプリムズ)の考えを提唱した[2]。それ以来、現在に至るまでｐプリムズは様々な立場から期待を寄せられている。Redish は物理教育研究の立場から、ｐ プリムズがカリキュラム改善と学生の思考解明に活用されることを期待している[3]。Hammer は教育実践への影響として、学生の考えを結局「誤り」とせざるを得ない誤概念に対して、ｐ プリムズの捉え方が学生の考えをより建設的に用いうることを指摘している[4]。また片平も理科教育学の立場から、ｐプリムズを社会的相互作用と並んで概念変容研究の発展に不可欠な要素であるとし､実態を解明し情報を蓄積する必要性を説いている[5]｡diSessa 自身が与えたｐプリムズの代表例に「オームのｐプリム」があるが、その事例の文脈は電気回路ではなく力学である。本研究は、電気回路におけるｐプリムズの実態に迫る試みである。

２．調査方法の概要

筆者らは大学の教育学部で、小学校教員を志望する学生（主として１年生）のための「理科実験観察法」の授業をティームティーチングで実施している。そこでの電気回路に関する実践が本研究の文脈である。筆者らの電気回路に関する一連の授業は、第二著者（小林）による授業Ａ(90 分+90 分）[6]、それから２ヶ月以上経過した時点での第三著者（山田）による Hawkins の考えを踏まえた探究授業Ｂ（90 分+90 分）[7]、さらにその翌週に行われる初歩的な講義授業Ｃ（90 分)、その直後に引き続き行われる第一著者（山本）の模擬授業Ｄ（90 分）である。本研究で検討したデータは、授業Ａの学生のワークシート記述・メモ、授業Ｃの学生のメモ、授業Ｄの学生のワークシート記述、および各授業における学生の応答発言である。これらを用いてｐプリムズの反映と解釈できる応答を探索した。筆者らの授業は互いに無関係に行なったものではなく、協働で計画を行い、また本研究のための暫定的な着眼点（作業仮説）として「電気抵抗と力学的な抵抗の混同」(オームのｐプリムと *Working Harder* のｐプリムの活性化）を互いに意識しつつ実践、実践後の省察、データの検討を行った。そうして見出されたｐプリムズの反映として最も顕著な授業場面を協議の上で決定し、エビデンスとして取り上げた。

３．結果

第一著者は「手回し発電機の手応えが LED より豆電球の方が大きくなるのはなぜか」を主発

問とする模擬授業を行った。導入として手回し発電機に LED を接続した場合と、豆電球を接続した場合の各々について、同じ速さでハンドルを回転させた場合の手応えを体験させた。その結果を踏まえて上述の発問を提示し、仮説を個人でワークシートに記入させ、教室全体で仮説の共有を行なった。その際に提案された仮説には様々な表現が見られたものの、授業者によって次の 3 種類に分類され、これについて学習者の同意も得られた。

仮説①	LED より豆電球の方が、流れている電流が大きいため、手応えが重い。
仮説②	LED より豆電球の方が、必要な電力が大きいため、手応えが重い。
仮説③	LED より豆電球の方が、電気抵抗が大きいため、手応えが重い。

ここに「必要な電力」という表現が現れている。授業者は確認のため「必要な電力とは消費電力のことですか」と質問したが、「違う」とのことであった。学生達の表象は「手回し発電機が供給する電力」でも「素子で消費される電力」でもなく「必要な電力」であった。

この分類に続き、3 つの仮説を同じ意味のもの(矛盾しないもの)に分類する活動を行ったところ、「①②vs.③」という分類と「①vs.②③」という分類に意見が分かれた。ここに学習者の「電力」に関する表象の違いが現れている[8]。後者の立場を取る者のワークシートには「手応えが重い→必要な電力が大きい→電気抵抗が大きい」といった記述が見られる。また「LED は省エネ」という観点から「省エネ→手応えが軽い→電気抵抗が小さい」という記述した者も見られる。「必要な電力」の表象の背後にオームの p プリムと *Working Harder* の p プリムの活性化がうかがわれる。

参考文献

[1] 例えば diSessa, A. A. (2014) A History of Conceptual Change Research: Threads and Fault Lines, In R. K. Sawyer (Eds) *The Cambridge Handbook of The Learning Sciences, 2nd edition*. (R.K.ソーヤー(編)(2009)『学習科学ハンドブック』培風館.)

[2] diSessa, A. A. (1993) Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2&3), 105-225.

[3] Redish, E. F. (2003) *Teaching Physics with the Physics Suite*, John Wiley & Sons. http://www2.physics.umd.edu/~redish/Book/ chap.2, p.27 (2017/07/07 アクセス). (E.F.レディッシュ(2012)『科学をどう教えるか―アメリカにおける物理教育の実践』丸善出版,p.43.

[4] Hammer, D. (1996) More than misconceptions: Multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and an appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64(10), 1316-1325.

[5] 片平克弘 (2017) 科学概念変容研究の展開と課題, 大高泉(編)『理科教育基礎論研究』協同出版, p.140.

[6] 山田吉英, 小林和雄, 山本修平(2016) 手回し発電の手ごたえに関する誤概念の研究－電池の消耗によるブリッジングの可能性に関する基礎研究－, 2016 年度 日本物理教育学会年会 第 33 回 物理教育研究大会要旨集, p.19-20.

[7] 石井恭子 (2014) 科学教育における科学的探究の意味-D.Hawkins による Messing About 論を手がかりに-, *教育方法学研究*, 39, 59-69.

[8] これは電力の式 P=IV における I と V のどちらに着目して電力を意味解釈したかの違いといえるかもしれない。しかしこのような解釈は p プリムズ論の本来の趣旨から逸れるだろう。

科学折り紙の手法を活用した理数科教材

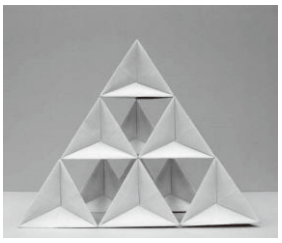
埼玉県立大学 保健医療福祉学部，石原正三
E-mail　shozo@spu.ac.jp

１．はじめに

同じ形状の折り紙（ユニット）を組み合わせて、くす玉などを制作するユニット折り紙の手法を発展させ、三角形のユニットを設計して、立体を多面体の骨格構造（スケルトン）で表現する手法を科学折り紙と呼び、科学折り紙の手法で制作した多面体のスケルトンを用いて制作された立体構造モデルを折り紙モデルと呼んでいる。水引と糊で多面体のスケルトンを接続し、規則的かつ無限に繰り返す結晶構造の周期性(Periodicity)を表現する結晶の折り紙モデル[1]や、ユニットのカイラリティを入れ替えるだけで、非対称な形状の多面体の鏡像体を簡便に制作する鏡像体の折り紙モデル[2]など、折り紙の造形美によって立体構造の特徴を視覚的に表現する折り紙モデルが開発されている。(図１参照)

本報告では、三角形のユニットを設計して任意の形状の多面体のスケルトンを制作する科学折り紙の手法を紹介するとともに、大学の教養科目「数理科学」の授業において実施した折り紙モデルの制作実習について報告する。また、これまでに小・中・高等学校で実施した折り紙モデルの出張講座の成果に基づき、理科と数学科における立体概念の形成を目的として、高等学校の理数科教育に折り紙モデルを活用することを提案する。

(a)



(b)

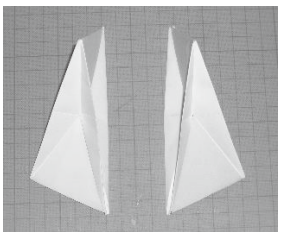


図１　折り紙モデル：(a)ダイヤモンド構造の折り紙モデル，
(b) Paul Schatz 四面体[2]の鏡像体の折り紙モデル

２．三角形のユニットの設計

以下、多面体の各頂点の座標は与えられているものとして議論を進める。科学折り紙では、多面体の各頂点の座標から重心の座標を求め、一本の稜線の両端の２点と重心が作る三角形を一つのユニットとして、多面体のスケルトンを組み立てるので、一つの多面体のスケルトンを組み立てるためには、稜線の数 E に等しい数のユニットが必要となる。

ユニットの形状は、頂点ＡとＢ、および重心Ｏの座標から求まり、一つのユニット（図２(a)）を制作するのに必要な折り紙の形状は、そユニットに使用する折り紙の寸法 a、l、および折り位置 c（図２(b)）を以下の式（１）から（３）を用いて求める。

$$\theta = \cos^{-1}\{(a^2 + {b_2}^2 - {b_1}^2)/2 \cdot a \cdot b_2\} \quad (1)$$

$$l = 4 \times b_2 \times \sin\theta \quad (2)$$

$$c = b_2 \times \cos\theta \qquad (3)$$

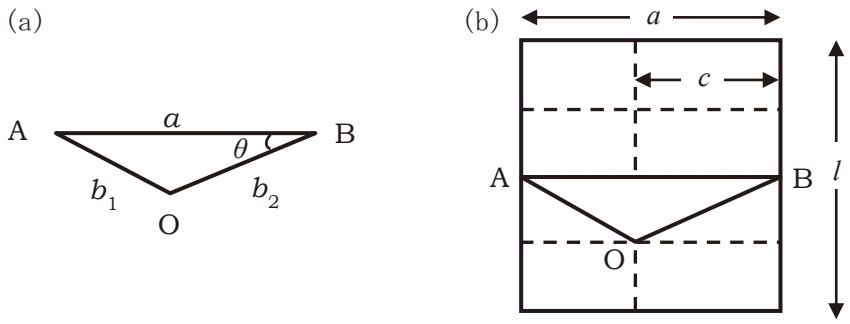


図２　ユニットの設計：(a) 三角形のユニットの形状，(b) 折り紙の寸法

３．学生が制作した折り紙モデル

平成 24 年度の教育課程の改訂に際し、保健医療福祉学部の１・２年次生を主な対象とする教養科目「数理科学」（後期開講選択科目）に折り紙モデルの制作実習を導入した。5 種類の正多面体（プラトン立体）の折り紙モデル（図３(a)）を例に、立体幾何学の基礎知識と科学折り紙の手法を説明した後、文献調査に基づき制作する立体構造を決定して、各学生が折り紙モデルの制作に取り組んだ。平成 26 年度に数理科学で学生が制作した作品例を図３に示す。

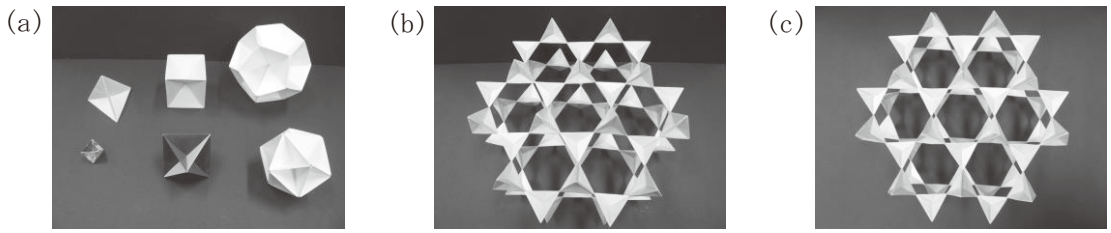


図３　教養科目「数理科学」の授業で学生が制作した折り紙モデルの作品例：
(a)はプラトン立体、(b)と(c)は六方晶系氷（I_h）の結晶構造の折り紙モデル

４．おわりに

中学・高校生から大学生までを対象として実施してきた折り紙モデルの制作実習では、ほぼ全員の受講生がユニット折り紙の作品制作に取り組み、実習後のアンケートには、折り紙モデルの実習に対してポジティブな感想を寄せている。

立体概念の形成は、理科教育と数学教育の共通の課題であり、折り紙モデルの制作実習の成果に基づき、立体の手触り感覚（体性感覚）を通して立体概念の形成を図ることを提案する。

参考文献

［1］Ishihara, S., “Science Origami, The Origami-model composed of Polyhedral Skeletons”, *The Journal of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry (ISIS-Symmetry), Symmetry: Arts and Science*, edit. G. Lugosi and D. Nagy, 2010, *1-4*, 100-103.

［2］Ishihara, S., “Origami-models of Paul Schatz Tetrahedra: A New Way of Making Chiral Shapes by means of Science Origami”, *The Journal of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry (International Symmetry Society), Symmetry: Arts and Science*, edit. I. Vandoulakis and D. Nagy, 2016, 1-4, 70-73.

英国Ａレベル物理試験の検討

香川大教育学部
笠潤平
E-mail:　jpryu@ed.kagawa-u.ac.jp

1. はじめに

2015 年秋より、英国（本稿では主にイングランド・ウェールズを指す）では、大学入学前の 2 年間のＡレベル諸科学への規制内容が改まり、『アドバンシング物理』他のＡレベル物理諸コースの内容も改められている。その最初の試験は本年 7 月に実施される。A レベル諸科学の評価方法における規制の最大の変化は、各学校で教員によって評価されてきた Investigation（以下探究活動）等のコースワークの成績が A レベルの最終成績に入らなくなった点である。本発表では、新しい A レベル物理試験の構造・内容および実験・探究活動の評価について、『アドバンシング物理』の例を中心に報告する。その際、岡本（高野山大）、谷口（京都教育大）とともに 2015 年に行った英国での物理教育関係者へのインタビューなどの調査その他を踏まえて、今次の制度改編の背景に触れる。

2. Ａレベル物理の新しい評価の構造

表 1 に、『アドバンシング物理』コースをつかさどる OCR 試験局の文書をもとに、同コースの新しい試験および最終評価制度の構造を示す。2 年間の課程の最後に行われる最終筆記試験は「物理の基礎」（2 時間 15 分）・「物理における科学リテラシー」（2 時間 15 分）・「物理における実験スキル」（1 時間 30 分）の 3 つからなり総計 6 時間にわたる。これまでは、①1 年目の終わりに AS レベルの試験を受け、残りの A2 課程の試験を 2 年目の終わりに受けることが可能だったが、今回から 2 年分の学習内容に関する試験を一度に受けることになった、②また、『アドバンシング物理』コース開始時には 2 年間に行われる（自由テーマの探究活動を始めとする）コースワークの成績が最終成績の 30%を占

試験		配点	時間	配点比
試験1	物理の基礎	110	2 時間 15 分	41%
	セクション A　多肢選択問題	(30)		
	セクション B　短答形式(構造化された問題、問題解決、計算、実験)	(20)		
	セクション C　短答形式(構造化された問題、問題解決、計算、実験)および長文回答問題	(60)		
試験2	物理における科学リテラシー	100	2 時間 15 分	37%
	理論と実験スキルを扱う構造化された問題と長文回答問題。この試験には、受験者への事前配布記事に関する問題が含まれる。 それは物理学の新しくわくわくするようなコンテキストにおいて自分たちの知識を適用するためである。			
試験3	物理における実験スキル	60	1 時間 30 分	22%
	実験のコンテキスト内の理論と実験スキルの評価に焦点を当てた、構造化された問題, 問題解決、計算そして長文回答問題			
試験外の評価	物理の実験活動の保証	合/否のみ ※A レベルの成績とは別に報告される。	各学校で2年間を通して随時行われ、記録される	0%
	OCR 物理 A および OCR 物理 B (アドバンシング物理)に共通の教師による評価部分。受験者は、実験の能力を示すために最低 12 の実験活動を完了する。			

表 1　新しい『アドバンシング物理』コースの試験と最終評価の構造（同コースの新しい規定文書をもとに作成）

めていたが、これからは全く入らない。この後者の点については、理系諸学会から、Ａレベル課程での実験活動・探究活動の軽視/形骸化につながり、英国の科学教育の根底を掘り崩しかねないなどという批判が出された。結局、“Practical Endorsement”（以下「実験活動の保証」と訳す）という制度がＡレベル科学全体に対して導入された。これは、生徒が、2 年間の課程を通じて、規制当局が定めた実験装置等を使う最低 12 種類の多様な実験を行うことを義務づけるものである。ただし、その成績は、Ａレベルの最終成績に反映されず、実験を修了したかどうかの合否のみが最終成績とは別に報告される。（英国の物理教育関係者の間ではこの制度に対する意見は分かれている。）

3. 試験問題例

OCR のサイトからは新しい試験問題のサンプルが得られ、先述した「物理の基礎」・「物理における科学リテラシー」・「物理における実験スキル」の試験がどのようなものかを知ることができる。

また、これまで実際に行われた探究活動とそのレポートをもとに評価表を用いて教師によって直接採点評価されていた実験・探究活動の各側面は、例えば、ASのコースワーク「測定の質」では、実験室での実験作業の質、 不確かさと系統的誤差についての考慮および測定を改善する試みの質、レポートにおける物理の伝え方の質、データの取り扱いと分析の質、A2のコースワーク「実験的探究活動」では、アプローチの仕方と実験的スキル、進展・自立性・物理的思考の活用、観察の質と表現、結論と評価であった。一方、新制度では、実験・探究活動のうち、計画・実施・解析・評価について、筆記試験の中で評価されるとされている。それをどのような問題と採点方法によって行おうとしているかがわかる。本発表ではとくにこの点を具体的に検討する。

4. 実験活動の保証

他方、「実験活動の保証」という制度で評価されるのは、計画と実施の領域、とくに、自立した思考、科学的方法と実践の使用と応用、調査と参照、実験装置・道具の側面であるとされている。しかし、OCRは規制当局（Ofqual）の基準を満たす12の実験群を示し、各実験群には3つずつ実験例を用意しているが、その具体的な実験書は登録した学校機関しかアクセスできない。また、それが実際にどのように機能しているかは今のところ情報がない。

今後、IoP（英国物理学会）の物理教育担当者や『アドバンシング物理第3版』編著者などを含めた英国の物理教育関係者との連携を深めて、英国での物理教育における探究活動の位置づけにどんな変化が起きるのか、明らかにしていく予定である。

本研究の一部は科研基盤(C)16K00968(代表者：笠潤平）の助成を受けて行われている。

参考文献

[1] 笠潤平, 化学と教育, *63*, 484, **2015**

[2] 笠潤平, 大学の物理教育**,** *20*, 89, **2014**

[3] 笠潤平, 岡本正志, 谷口和成, 英国中等科学教育の現状についての調査報告,日本物理学会第 72 回年次大会(2017)概要集

[4] Evans, S. & Wade, N., Endorsing the practical endorsement? OCR’s approach to practical assessment in science A-levels, *SSR, 96,* **2015**

[5] OCR, A level specification Physics B (Advancing Physics), OCR, **2014**

[6] Herklot, L., Advancing Physics 3rd edition, OUP, **2015**

「二大世界体系についての対話」（天文対話）の英訳本において省略された図について

武蔵野大学　大室　文之
E-mail:　fuohmuro@musashino-u.ac.jp

１　はじめに

1632 年に出版されたガリレオ・ガリレイ（以下「ガリレオ」）による「二大世界体系についての対話」[1)]（以下「原本」）は，我が国では「天文対話」と通称され，青木靖三の訳による岩波文庫版[2)]（以下「邦訳」）などがよく知られている．青木は翻訳にイタリア語の諸版本を使用している．さらに，3 つの版本を参照したと述べているが，そのうちの１つである 1953 年にシカゴにおいてジョルジョ・デ・サンティリャーナ（以下「訳者」）により出版された英訳本[3)] では，原本中の一部の図が省略されている[4)]．邦訳ではこうした省略は見られない．そこで，英訳本でこれらの図が省略されている状況を調べたので報告する．

２　省略された図と本文の内容

英訳本では３つの図と関連する本文が省略されている．省略されたのは 4 日間の対話中の第１日の最初に近い箇所で，邦訳では約４ページ分に相当し，次元が３つあることの幾何学的証明について記述された部分である．ガリレオは原本では図番号を記していないが，英訳本で省略された図は，邦訳では第Ⅰ図，第Ⅱ図，第Ⅲ図に相当する．本稿では，この３つの図を，それぞれ図１，図２，図３として以下に示す．訳者は省略した箇所について，「（ガリレオの）このちょっとした脱線の目的は，読者にスコラ学派の偏見を示すことにあった．スコラ学派の偏見とは，自然の事象を説明する際には幾何学的な厳密性を求めるべきではない，というものである」との意を述べている．

（１）第Ⅰ図では，２点間の距離を定めている

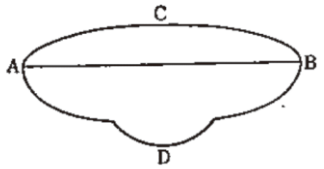


図　1

図１において，曲線ＡＣＢ，曲線ＡＤＢ，直線ＡＢのどれがＡＢ間の距離を定めるかとサルヴィアチが問い掛けている．これに対して，サグレドが直線であると応え，サルヴィアチが両端間の長さを規定するために直線をとる，と引き取っている．

そして，第１次元は直線によって規定されると結論付けている．なお，曲線ＡＤＢは，原本では必ずしも左右対称には見えないが，邦訳では形が整えられた曲線となっている．

（２）第Ⅱ図では，直線間の幅を規定している

直線ＡＢと直線ＣＤがつくる面について，その幅は何によって規定されるかを，図２によって議論している．シンプリチオは直線ＡＦによるとするが，これにサレグドが異を唱え，

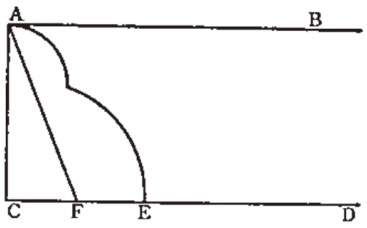


図　2

Ａから直線ＣＤ上に引かれる線のうちで最も短い，ＣＤに直角をなす直線であると主張する．そして，サルヴィアチはサレグドを支持する．

ここでは，第２次元，つまり幅も直線によって，ただし，長さを規定している直線と直角をなす直線によって，規定されるとまとめている．

（３）高さを議論し，第Ⅲ図で説明する

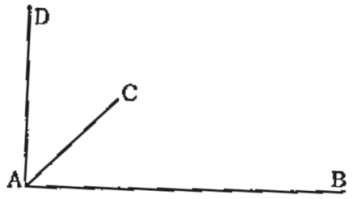


図　3

サルヴィアチが高さを規定することを提言し，サレグドの意見を容れて，第３次元を表すべき直線は，他の直交する２直線と，斜めではなく，それぞれ直角をなすようにしなければならないとする．

つまり，図３において，ＡＢは長さ，ＡＣは幅，ＡＤは高さであるとするものである．そして，同一点では，互いに直角をなす３本以上の直線を交わらせることは決してできないと説明する．シンプリチオも意見を述べるが有効な反論には至らない．

３　結語

訳者によって省略された箇所について述べた．この部分がないと，世界が立体であること等に関する「天文対話」における具体的な説明を知る機会を失ってしまう．したがって，この省略は，英訳本が本文全体で 506 ページである中で量的には極めて少ないことなども勘案すると，訳者の意図に関わらず不本意である．

文　献

[1] Galileo Galilei″ Dialogo di Galileo Galilei Linceo matematico sopraordinario dello stvdio di Pisa. E filosofo, e matematico primatio del serenissimo gr. dvca di Toscana. Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano; proponendo indeterminatamente le ragioni filosofiche, e naturali anto per l’ vna, quanto per l’ altra parte.″ Fiorenza, Per Gio: Batista Landini,1632,pp4-6.

[2]ガリレオ / 青木靖三 訳,″天文対話（上）″,岩波文庫,1988,pp.24-27.

[3] Galileo Galilei / Giorgio De Santillana, ″Dialogue on the Great World Systems″, The University of Chicago Press, 1953, pp.15-16.

[4]大室文之,″「二大世界体系についての対話」(天文対話)と「自然淘汰における種の起源」(種の起源)から探る科学的概念の転換に関する考察″,武蔵野教育学論集,創刊号,2017, pp.85-98.

光電効果に関して教師は何を教えるべきか

駿台予備学校　　牛尾健一

eoku815@hera.eonet.ne.jp

アインシュタインは 1905 年に発表した論文 1)において、光を現在では「光子」と呼ばれる粒子の集まりからなるとする仮説を提唱し、この仮説に基づき光電効果に対して次の関係式を示した。

$$\frac{1}{2}m{v_{\max}}^2 = h\nu - W \quad \cdots(1)$$

左辺は仕事関数 W の金属に振動数 ν の光をあてたときにその表面から飛び出す光電子がもつ最大の運動エネルギーであり、右辺における h はプランク定数である。アインシュタインは、この論文において式(1)から推測される実験的な状況を考察した。それは、光電子を放出する金属に正の電位 V を与え、周囲を電位 0 の導体で取り囲み、V が、金属から電子が失われるのをちょうど阻止できるだけの大きさならば、e を電気素量として次の関係式

$$eV = h\nu - W \quad \cdots(2)$$

が成り立つというものであった。

これに対し、ミリカンは彼の実験に基づき、1916 年に発表した論文 2)において、次の関係式

$$\frac{1}{2}m{v_{\max}}^2 = e\left(V + K\right) = h\nu - W \quad \cdots(3)$$

を示した。以下では、光電子を放出する電極を陰極と呼び、アインシュタインが想定した電位 0 の導体にあたる電極(ミリカンの実験装置では陰極からの光電子を受ける電極)を陽極と呼ぶことにする。また、陰極に与えた電位 V (陽極の電位を基準とする)を阻止電圧と呼ぶことにする。K は、陰極の金属と陽極の金属の間の接触電位差である。

式(3)によれば、式(1)は成り立つが、K が 0 でない限り、式(2)が成り立つことはない。ところで、式(3)における接触電位差 K については、放出された光電子を集める陽極の仕事関数を W' とすると、次の式が成り立つ。

$$eK = W' - W \quad \cdots(4)$$

これと式(3)を用いると、次式が得られる。

$$eV = h\nu - W' \quad \cdots(5)$$

式(5)は、多くの教科書に載せられているアインシュタインの式(2)とは似て非なるものである。式(2)は「阻止電圧 V が陽極の金属の種類にはよらず、陰極の金属の種類によって変化する」という推測を表したものであるが、式(5)は、ミリカンが得た実験事実の一つである「阻止電圧 V が陰極の金属の種類にはよらず、陽極の金属の種類によって変化する」ことを正確に表すものである。これらの二つの主張は著しく対立する。我々は、光電効果を学ぶ者に対してどちらの内容を教えるべきであろうか。当然のことであるが、それは式(1)と理論に裏打ちされた実験事実としての式(5)の組み合わせとそれらから帰結する事柄であろう。式(1)と不正確な理論式でしかない(2)の組み合わせとそれらから帰結する事柄では断じてあり得ない(教科書を教え、それに合わせた試験問題を作ってきた多くの教育関係者は、容易には認めたくないであろうが)。

この問題は、長年繰り返し指摘され、教育上の改善案も唱えられてきた。これを論じた論文としては、既に 1970 年代から A.N.James の論文 3)あるいは J.Rudnick と D.S.Tannhauser による論文 4)があり、比較的最近では立沢、坂井、野々山による論文 5)、最も新しいものとして D.R.Lloyd による論文 6)がある。欧米で出版されている大学の教科書の中には、既に誤りを修正した例も確認できる 7)。しかし、世界的に見れば、式(2)による誤った理解に基づく出版物やネット情報は多く存在し、我が国においても、そのような例は高校の教科書 8)、大学入試問題 9)、大学の教科書 10)にあふれており、今後もそれらは放置されそうな気配である。このような実情を多くの関係者に理解していただき、現状が改善されることを願い、今さらではあるが、研究大会の場を借りて発表を行うことにした。

今回の発表では、金属内電子のエネルギー準位(特にフェルミ準位が重要な役割を果たす)に基づく観点から仕事関数や阻止電圧の内容を見直すことにより、光電効果に対する長年の誤解の原因を明らかにする。このような点を踏まえた上で、今後の高校の物理教育において、「式(2)を取り下げて式(5)にもまったく触れない」、あるいは「式(2)の代わりに式(5)を全面的に取り上げる」のいずれを選ぶか、教育関係者全体として態度を明確にすべきではないかと考える。そして、誤解の氾濫する現状を今後どのように改善していけばよいのかについて、いくつかの提案を行いたい。

引用文献

1) A.Einstein：Ann. Phys. 17(1905)132-148
『アインシュタイン論文選』筑摩書房(2011)319-343
2) R.A.Millikan：Phys.Rev.7(1916)18-32
3) A.N.James：Phys.Educ.8(1973)382-384
4) J.Rudnick, D.S.Tannhauser：Am.J.Phys.44-8(1976)796-798
5) 立沢尚史、坂井伸之、野々山信二：大学の物理教育 11-2(2005)70-71
6) D.R.Lloyd：Am.J.Phys.83-9(2015)765-772
7) D.Halliday,R.Resnick,K.Krane ： “Physics Vol. 2 (fourth edition)” John Wiley & Sons,Inc.(1992)1029
8) 『物理』数研出版(2013)など多数
9) 『全国入試問題正解(2017 受験用)物理』旺文社(2016)10(大学入試センター試験)など多数
10) 原康夫『量子力学』岩波書店(1994)など多数

ビー玉スターリングエンジンの運動学的考察と数理モデリング

兵庫教育大学　猪本　修
E-mail inomoto@hyogo-u.ac.jp

ビー玉スターリングエンジン

スターリングエンジンは，装置内に密閉された作動気体が外部からの熱エネルギーによって仕事をする外燃機関である。作動気体が封入されたチャンバーは２つのタンクによって高温熱源と低温熱源それぞれに接していて，それらのあいだに設けられたディスプレーサによって系と外部との熱量輸送がステップ状に制御される。熱サイクルは定積加熱・等温膨張・定積冷却・等温圧縮の４過程から成り，熱効率は理想的にはカルノーサイクルのそれに一致する。

ビー玉スターリングエンジンはディスプレーサとして数個のビー玉が用いられるもので，エンジンとしてのはたらきが気体の体積およびビー玉の変位によって観察できる。比較的簡素な構造のために装置の組み立てが容易であり，かつその挙動が印象的であるため，高校物理に好適な教材として提案された[1,2]。ただし温度や熱量などの熱力学変数は測定しにくいため，熱効率を定量的に見積もることは容易でない[3]。

本研究ではこの系の力学的挙動の時間的特性を詳しく調べるため，系のダイナミクスを端的にあらわす数理モデルを構築した。これによって力学的運動の周期や振幅などが熱力学パラメータにどのように依存するのかを検討した。

動力学的特性とモデリング

ビー玉スターリングエンジンは，定常的な熱エネルギーの流れの条件下で系の非線形特性（ディスプレーサのスイッチング機構）によって発現する自励振動である。作動気体の体積とビー玉の重心の変位を変数に選んで２次元運動方程式をたてたところ，振動解が数値的に得られた。さらに，モデルをより簡便にするために，系の体積 V についての１次元運動方程式を検討した。すなわちディスプレーサの特性を２価関数 $f(V)$ で表して $\dot{V}=f(V)$ とした。ここで関数 $f(V)$ は，$V_1<V_2$ に対して，$f(V)=W_1>0\ (V<V_2)$ および $f(V)=W_2<0\ (V>V_1)$ とした。ただし W_1, W_2 は定数である。これによって系の諸特性を検討した。

講演ではモデリングに関する詳細を述べるとともに，従来の実験教材に対して本研究の成果を如何に反映させることが可能かを議論する。すなわち生徒がビー玉スターリングエンジンを運動学的に考察することで，系の状態変数を選びだし，モデル方程式をつくって数学的に諸特性を検討することができると思われる。モデリングは生徒の考察力の向上に寄与すると期待される。

[1] 喜多誠，物理教育通信 Vol. 90，93（1997）.
[2] 東京大学教養学部附属教養教育開発機構，見て体験して物理がわかる実験ガイド（学術図書出版社，2007）.
[3] 安孫子和弘，田代貴美，物理教育 Vol. 59，54（2011）.

ポスター発表プログラム

８月 11 日（金）・12 日（土）　12:00～13:30　　会場 ギャルリー・パンセ

P-1	ハンドスピナーの物理教育への利用	梶山 裕二	・・・ 93
P-2	高濃度砂糖溶液を利用した旋光現象の観察と透過光の色変化の予測	徳光 聖茄	・・・ 95
P-3	久留米工大における物理基礎教育体制の構築-基幹センターの活動報告-	巨海 玄道	・・・ 97
P-4	超音波を用いたビデオ教材の開発－薄膜干渉－	為野 未波	・・・ 99
P-5	ローレンツ力による金属線のたわみと共鳴振動	絹川　亨	・・・101
P-6	高校科学部と連携した、ペットボトルロケットの飛び方と内圧に関する研究	南　伸昌	・・・103
P-7	探求型生徒実験の実践例	小河原康夫	・・・105
P-8	単極回転・単極誘導の実験	秋山 和義	・・・107
P-9	中・高・大学生による科学解説イベントの運営と活動を通じた成長過程	川口　喬	・・・109
P-10	Advancing Physics A2 に見る熱概念	五十嵐靖則	・・・111
P-11	科学的推論能力の育成に着目した高校物理授業の効果２	山下　哲	・・・113
P-12	電束電流（変位電流）が磁場を作る演示実験	横田　穣一	

ハンドスピナーの物理教育への利用

岐阜聖徳学園大学　教育学部，　梶山裕二
E-mail　kajiyama@gifu.shotoku.ac.jp

１．はじめに

最近世間で流行しているハンドスピナー（Fidget Spinner）というおもちゃがある。数百円から入手でき、指で回すだけという簡単な操作で比較的長時間（数分間）の回転運動を維持できることができることから、物理教育上の有用性がしばしば議論されている。

本発表では、ハンドスピナーの角速度、角加速度、慣性モーメント、歳差運動、ジャイロ効果等について調べ、物理教育上の効果を議論する。なお測定にはナリカ(株)のイージーセンス V-Log と光ゲートセンサを用い、付属の解析ソフトおよび Microsoft Excel for Mac 2011 によって解析した。

２．物理的性質

ここでは Y 字型、質量 40.2g、Y 字一本の枝の長さ 4.2cm のハンドスピナーを使用した（図１）。

①角速度と角加速度：このハンドスピナーを図２のようにセットし、Y 字の枝と次の枝がセンサを通過するのにかかる時間を測定した。そこから角速度[rad/s]を縦軸、回転はじめからの経過時間[s]を横軸にとると、一例として図３のようになる。この直線の傾きから角加速度、縦軸との交点から角速度の初期値を読み取ると

角加速度の大きさ：1.8 rad/s^2　　角速度の初期値：73 rad/s

となる。

②慣性モーメント： 図４にあるように糸を Y 字の先端部分につけ、ひねり運動の周期から慣性モーメントを測定することができる。また理論的にも、幅のない Y 字型の物体の重心まわりの慣性モーメントで近似する。両者の値は

実験：2.6×10^{-5} kgm^2　　理論：2.4×10^{-5} kgm^2

と得られる。

③歳差運動：図１のようにハンドスピナーの中心部（回転しない部分）に両面テープで画鋲を取り付ける。画鋲の針を下にしてコマのように回転させると歳差運動が起きる。これまでの実験値とハンドスピナーの重心の高さ 1.4cm を用いると、歳差運動の周期の理論値が計算できる。これを実際に測定した実験値と比較すると

理論：2.5 s　　実験：1.9 s

となった。ただし理論値の角速度は 60rad/s であるとした。実験の際の角速度が不明であるため、上記の二つの値が一致するとは限らない。

④ジャイロ効果：画鋲を軸として上から見て時計回りに回転しているハンドスピナーの中心部分を少し前方へ押すと、右側に傾き歳差運動を始めることが確かめられる。また中心部分を指で挟んで回転させると、ハンドスピナーを傾けるときに指が抵抗を感じることが分かる。中心部分が回転しないため、回転運動を妨げることなくジャイロ効果を実感することができる。

３．物理教育への利用

高等学校の物理においては、前節の物理量のうち角速度のみが登場する。雑学としては歳差運動やジャイロ効果を聞いたことがある生徒も一定数いると思われる。これらの性質を手軽な実験と（天下り的に与えた）公式によって、発展的な学習として取り入れることができる。コマと比べてよい点として以下があげられる。すなわち、回すことが簡単で何度でもすぐにやり直せる、慣性モーメントが求めやすい形のため公式を使って定量的な議論ができる、中心部分が回転しないので触って姿勢を直したり手が受ける抵抗力としてジャイロ効果を実感できる、等である。

一過性のブームで終わらず、今後の教育的利用の一助になれば幸いである。

図１：ハンドスピナー
（中心に画鋲をつけたもの）

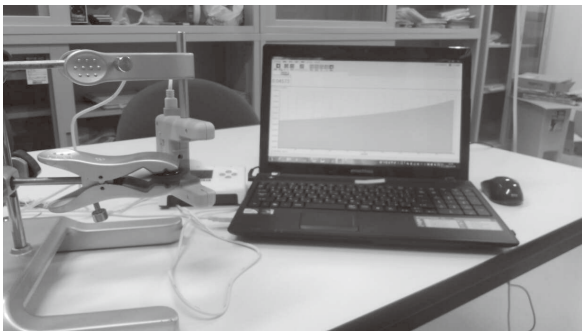


図２：角速度の測定の様子

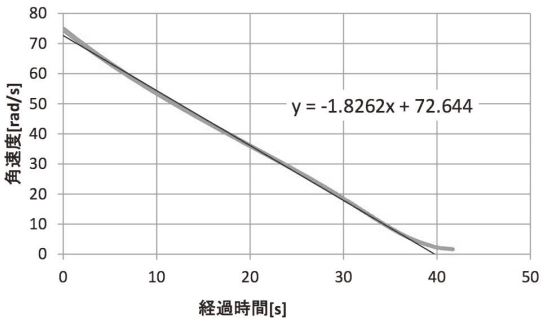


図３：経過時間と角速度の関係。近似直線を重ねてある。

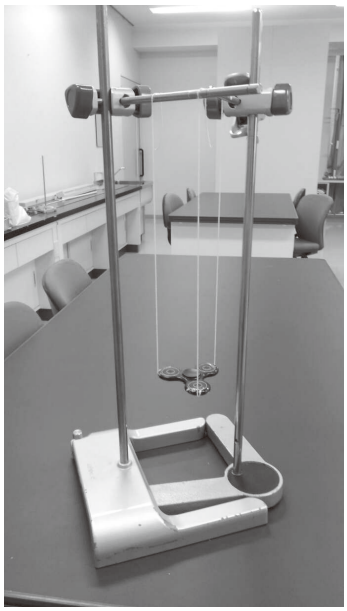


図４：慣性モーメントを測定する実験

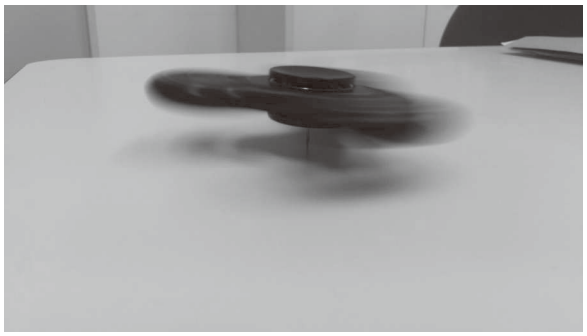


図５：歳差運動の様子

高濃度砂糖溶液を利用した旋光現象の観察と透過光の色変化の予測

千歳科学技術大学, 徳光聖茄, 長谷川誠*

*E-mail　hasegawa@photon.chitose.ac.jp

1．はじめに

偏光板を用いた演示実験には複数の内容があるが, 一対の偏光板の間にセロハンテープ等を挟み込んで観察する複屈折現象は, 透過光が着色するために興味を引きやすい. 一方, 類似の着色現象として, 高校化学[1)]等でも紹介されている旋光現象に起因するものがある. 今回は, 旋光現象による透過光の着色に関する演示実験の効果や有用性を向上させることを目指して, 観察される透過光の色の予測を試みた. その結果, 旋光現象による透過光の色変化の予測が可能となった.

2．砂糖溶液の旋光現象について

平面偏光の電場の振動面は, 光学活性物質を透過したときに旋光現象により回転する. 光学活性物質の一つである砂糖(スクロース)は, 入手の容易さや物質自体の認知度から, 旋光の演示実験などでよく使われる[2,3)].

旋光現象による電場の振動面の回転方向には右回りと左回りがあり, 測定等によって判断されるが, 砂糖については複数文献[4,5)]に右回りの回転が発現するとの記載があるため, 以後, 右回り(右旋光)を想定する.

3．比旋光度から旋光度への変換

光学活性物質に平面偏光が入射した場合における電場の振動面の単位長さあたりの回転角(旋光度ϕ：弧度法表示)は, 以下の式で表される.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} g_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{2\pi N c (2 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})}{3\lambda_0} \beta \qquad (1)$$

第 2 項のg_0は旋回係数と称されている. さらに, λ_0は真空中の波長, Nは単位体積あたりの分子数, εは誘電率, ε_0は真空中の誘電率, βは構造に由来する定数である.

一方, 溶液や有機分子の旋光能を表すときには, 旋光度よりも比旋光度α(度数法表示)が主に使用される. 比旋光度は NaD 線(589nm)が温度 20℃で濃度$C[g/cm^3]$の光学活性物質を 10cm(=1dm)透過した時の電場の振動面の回転角として, 以下の式で定義される.

$$\alpha = \frac{\phi_D}{C} \cdot \frac{1800}{\pi} = \frac{N_A \phi_D}{N_C \cdot M} \cdot \frac{1800}{\pi} \qquad (2)$$

式中の旋光度にある添字の D は, NaD 線の波長に対する値であることを示している. N_Cは濃度 C のときの単位体積あたりの分子数, N_Aはアボガドロ数, Mは分子量を示す.

(1)式にあるように旋光度は波長及び溶液濃度に依存する. また, 比誘電率が含まれているため, 誘電分散の影響を考慮しなければならない. これに関して Biot は, 比旋光度が可視領域においてほぼλ^{-2}に比例することを示している(Biot の逆 2 乗則[6)]). これより, 可視領域では$\varepsilon/\varepsilon_0$ = 一定とみなすことができると考えられるため, 旋光度は以下のように示される.

$$\phi = \frac{N}{\lambda^2} \frac{4\pi^2 c}{3} \beta \left(2 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) = \frac{N}{\lambda^2} g' \qquad (3)$$

(3)式に含まれるg'は, 既知の数値または物質固有の定数で構成される部分をまとめた係数である. この係数g'を求められれば, 任意の波長及び溶液濃度に対する旋光度を算出できる. そのためには, 光学活性物質の特定の溶液濃度及び波長に対する旋光度の既知の値を用いて, 係数g'を逆算する必要があるが, 著者らの調査ではそのような旋光度の値は得られなかった. その一方で, スクロース分子の比旋光度の値は得られたので, 比

旋光度から旋光度を得られるように，(2)式を変形した．

$$\phi_D = \frac{\alpha N_C M \pi}{1800 N_A} \tag{4}$$

この時点での旋光度の値はまだ NaD 線に限定される．次に，(4)式を(3)式へ代入し，係数g'を表す(5)式を導出した．

$$g' = \frac{\alpha N_C M \pi}{1800 N_A} \cdot \frac{\lambda_D^2}{N_c} = \frac{\alpha M \pi \lambda_D^2}{1800 N_A} \tag{5}$$

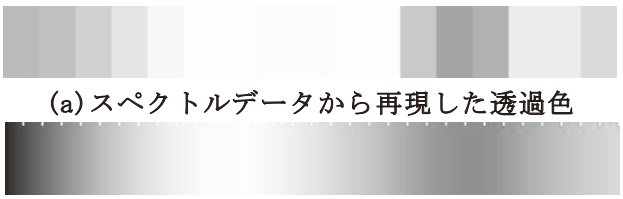
この(5)式に，NaD 線の波長，比旋光度の値(66.03 度)，スクロースの分子量(342.2[g/mol])を代入し，係数g'を算出した．さらに，こうして得られた係数g'の値をあらためて(3) 式に代入することで，溶液濃度及び波長を変数とする旋光度の一般式として(6)式が導出された．なお，この過程で比旋光度としては，理科年表 [7]に記載されている濃度65%における値を採用した．

$$\phi = \frac{N}{\lambda^2} \cdot 2{,}276 \cdot 10^{-35} \tag{6}$$

著者らの調査では，(6)式のような関係式は，従来は文献に示されていなかった．砂糖溶液以外の物質に関しても，比旋光度の値が得られれば，同様の手順で，旋光度を示す一般式の導出及び旋光度の算出が可能になる．

4．旋光による色変化の観察及び予測

砂糖溶液による旋光現象の観察のため，自作の水槽(長さ 32cm 幅 9cm 高さ 9cm)に高濃度に調整した砂糖溶液(水 300g に砂糖 700g)を入れ，水槽の短辺に白色光源及び偏光板を設置し，その偏光板とクロスニコル配置となるようにもう 1 枚の偏光板を砂糖溶液中に入れた．水槽内の偏光板を動かして偏光板間の距離を 2cm ずつ変えながら，分光計(コニカミノルタ CS-1000)で透過光スペクトルを測定した．また，算出した旋光度を用いて，使用した実験系で観察され得る透過光の色の予測を行った．両者の結果を図 1 に示す．



(a)スペクトルデータから再現した透過色

(b)得られた旋光度から予測した透過色

図 1　透過色を再現した色度図

(左から右にかけて偏光板間の距離は増加)

スペクトルデータから再現された透過光の色変化(a)の大まかな傾向は，(6)式から得られた旋光度による予測(b)とほぼ一致した．

5．まとめ

光学活性物質の旋光度を任意の波長及び溶液濃度に対して算出することが可能になり，砂糖溶液による旋光現象での透過光の色変化の予測が可能となった．予測結果は，実際の観察結果とおおよそ一致した．こうした予測が砂糖溶液による旋光現象を演示する際の有用性の向上につながると期待される．

参考文献

1) 高等学校 化学，pp.272-273（第一学習社，2015）.

2) 理科の探検 RikaTan ，2008 年 6 月号「特集 光と色の実験」，pp.4-31（星の環会，2008-6）.

3) 京都市青少年科学センター：「理科オンライン辞典／科学実験・工作／カラフル砂糖水」(http://www.edu.city.kyoto.jp/science/online/labo/14/index.html)

4) John McMurry：「マクマリー有機化学（上）第 8 版」，pp.133-172（東京化学同人，2013）

5) 林茂助：「有機化学」，pp.153-164（日刊工業新聞社，1993）

6) 工藤恵栄：「分光の基礎と方法」，pp.275-321（オーム社，1985）.

7) 理科年表（平成 28 年版），p.466（丸善出版）.

久留米工大における物理教育体制の構築
—基幹教育センターの活動報告—

久留米工大基幹教育センター[1]、教育創造工学科[2]、共通教育科[3]
巨海玄道[1]、野田常雄[2]、江藤徹二郎[3]、中村文彦[2]、金井政宏[2]、中嶋康博[2]、
酒見龍裕[1]、諏訪辺美津子[1]、荒川彰子[1]
E-mail　geomi@kurume-it.ac.jp

１．はじめに

昨年の本研究会で本学の「基幹教育センター」が設置されるまでの背景について経緯を紹介した[1]。現在所謂Ｆランク大学（あるいは全入大学、限界大学と呼ばれる場合もある）においては全入に伴う高校時代に多様な学習背景を持つ学生が入学してきており、これらの学生にこれまでの通常の大学生並みの学力をつける、所謂「付加価値を付ける」、ことは当該大学の存立基盤の一つと考えられ、各大学でその大学特有の多彩な試みがなされている。しかしながらもともと学習意欲がなく大学で学ぶ意欲も欠如した新入生をどのようにして「学びの原点」に立たせるのか、あるいはそもそもそのようなことが可能なのか？この問題は学生一人一人によって異なるものであり、これといった妙案がないことも共通している。学習支援センター、ラーニングコモンズ、オフイスアワー、等各大学で特色ある試みがなされているが最も大事なことはそれを担う人材、教職員の意識と共同作業の認識、等である。現在大学は学科という所謂専門課程の教育を担う部署と全学教育を担う例えば共通教育科、に大別される。専門学科ではこれまでと変わりないやや狭義の教育がなされており、それを担当する自分の狭い専門分野の閉じこもる人が多い。他方後者を担当する部署でも、中学・高校の延長の教育としかみなされない初歩的内容に甘んじている場合が多く見受けられる。このような背景から本学の「基幹教育センター」の目指すものとその現状・問題点等について報告したい。

２．センター業務について

本センターは昨年（平成 28 年）4 月より開設された。当初は専属の事務職員も助教もなく、教育創造工学科の教員を中心としたサポート体制で出発したが学内の教職員の認知度は殆ど０であり、関係者が思うほどスムースな出発ではなかった。本学ではこれまでこの種の学習支援センターがあったがほとんど機能していなかった。その原因は色々あるが代表的なものは以下のようなものであろう。

１）学習支援センターを作れば「成績の悪い学生は黙っていても質問に来る」と考える人が多い。
２）教員はこれまでと同じ講義をしていれば学生の学力は伸びる。
３）学生の資質や学習態度は 10 年～20 年前と同じで時間変化はしていない。
４）卒業には適当なテーマで仕事をさせれば他大学と同じレベル（即ち「付加価値」）を身に付けることができる。

等であろうか。本学のほとんどの教員がこのような幻想に浸っていたことは想像に難くない。勿論それなりの問題意識を持った教員もいたがその活動は個人の範囲に限られていた。成績が悪い学生をいい方向に持って行く、あるいは勉学の習慣を身につけると言う事がいかに難しい

か・・・それを教職員に感じさせるのも本センターの重要な業務の一つであろう。

2.1 28年度の業務概要

初年度は基本的には物理と数学を基本として他分野を含めて学習支援を行った。このような状態の中でセンターは以下のような手段で来訪者を確保した[2]。

１）指名式来訪者の確保：講義中に成績が悪い学生を選び放課後センターに来るように促す。

２）来訪者をリラックスさせ、なんでも相談にのるるような体制を敷く・・・これは担当者の力量によるところが大であった。

このようなシステムをとった為、来訪者は28年度は600名近くにも上った。来訪者は1年生に限らず2～4年生も含まれた。又リピーターも多く最高は30回を超えた。

2.2 29年度の業務実績・・・途中経過

本年度も基本的には物理と数学の学習支援を行うことに変わりはない。本年度の大きな変化は事務職員と助教が新しく着任したことである。現在のスタッフの構成は

（専任）センター長：1人、助教（物理学、数学）：1人、非常勤（数学）：1人、事務職員：1人

（併任）物理学：3人、数学：3人

今年度は基本的に昨年度と同じやり方をするとともに、クラス分けをした中で最低レベルのクラスでは90分の講義のうち講義60分、演習30分と大きく分け、助教も手伝って指導に当たった。

３．入学前教育の試み

入学前に基礎学力を付けさせる試みは多くのＦランク大学を中心として行われているが本学はそれがなかった。これはある意味驚くべきことであった。平成29年度は試みにある高校からＡＯ入試や推薦方式で入学してくる学生たちを対象に数学の試行的入学前教育を行った。学生数は47名であった。これらの学生に2月頃演習問題を郵送し、入学式の時に集め、それを採点して成績不良者は呼び出し指導を行った。この結果について簡単に述べたい。

表１．入学前教育のまとめ

	対象者人数	提出済み人数	合格人数	(提出時合格)	未合格者	(未提出/未連絡)	(無断欠席)	(連絡有/例外)
機械	6	4	2	(1)	4	(1)	(3)	0
交通	23	16	8	(2)	15	(5)	(8)	(2)
建築	4	3	3	0	1	(1)	0	0
情報	13	12	12	(3)	1	(1)	0	0
教育	1	1	1	(1)	0	0	0	0
合計	47	36	26	(7)	21	(8)	(11)	(2)

47名の進学先はばらつきはあるが基本的には4つの学科にまたがっている。合格人数と未合格者の人数も各学科によって異なるが未提出/未連絡および無断欠席が多い学科の指導は大きな問題となる。これらの学生は学習のスタートラインに立っていないことになり、その対策は単に本センターのみではなく当該学科の教員とも連携しながら当たっていく必要がある。入学前教育の形態などについては来年度の検討すべき大きな課題となる。

参考文献

[1]巨海玄道ら：第33回ぶつり教育研究大会発表予稿集、(2016年、新潟大学) p. 83

[2]詳細は“久留米工業大学基幹教育センター年報、創刊号”(2017年、3月発行）参照のこと。

超音波を用いたビデオ教材の開発
― 薄膜干渉 ―

為野 未波[a]，藤嵜 雄大[a]，山中 翔平[a]，加納康裕[b]，
筒井 和幸[c]，本管 正嗣[c]，幾見 優子[d]，山本 健[a]
関西大学システム理工学部物理・応用物理学科[a]，大手門学院中学校・高等学校[b]
大阪教育大学付属高等学校池田校舎[c]，関西大学北陽高等学校[d]
E-mail　k195380@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

我々は，透明固体中及び水中を伝搬する超音波を光学的に可視化することにより，そのスローモーション動画を波動分野の学習用教材として開発し，教育現場へ配布している．今回，光学分野の薄膜干渉の教材を作成するにあたり，長方形及び楔形ガラスにおける超音波の干渉実験を行ない，その様子を動画として撮影した．ガラスの上面で反射した超音波と内部で反射した超音波による干渉を視覚的に理解できるビデオ教材を開発したので報告する．

2. 超音波の光学的可視化

水中の超音波を光学的に可視化する方法として，超音波の波面を観察できる Fresnel 法や，波面は可視化できないが音線として認識できる schlieren 法が挙げられる．本研究では，干渉による超音波の強め合い及び弱め合いを撮影するため，コントラストの良い schlieren 法を用いた（Fig.1）．光源には短時間発光可能な Xe フラッシュランプを使用し，その発光タイミングは超音波励起と同期している．光をレンズ L1 で集束させ，スリット 1 を用いて空間的ノイズを除去する．L2 で平行光線として超音波が伝搬する水槽へと導く．超音波が伝搬していない場合，L3 によって集束した光は，スリット 2 によってカットされるため，カメラでは暗視野が観察される．ここで，超音波を伝搬させると，光は水中の超音波の周期的な屈折率変化（回折格子）によって回折する．回折光だけがスリット 2 を通過できるようにスリット幅及び高さを調整すれば，カメラは超音波で回折した光だけを捉えることができる．超音波励起と発光タイミングに一定の遅延時間を与えると，超音波の伝搬を静止画として観察できる．遅延時間を連続的に増加させると超音波の伝搬をスローモーションとして観察できる[1]．実際には，約 1500 m/s の速度で水中を伝搬する超音波であるが，ビデオ教材では，十数秒のスローモーション動画として観察することができる[2][3]．

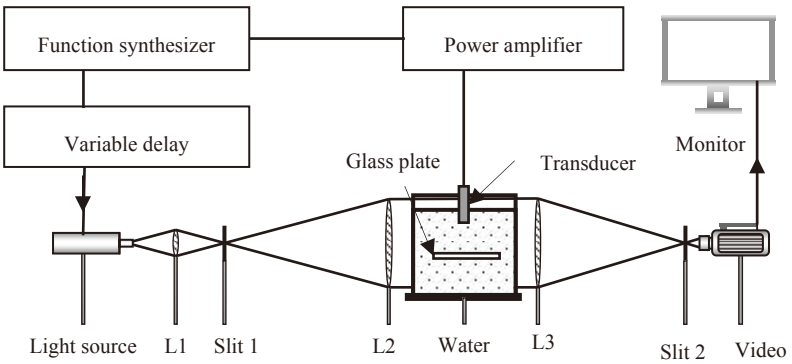
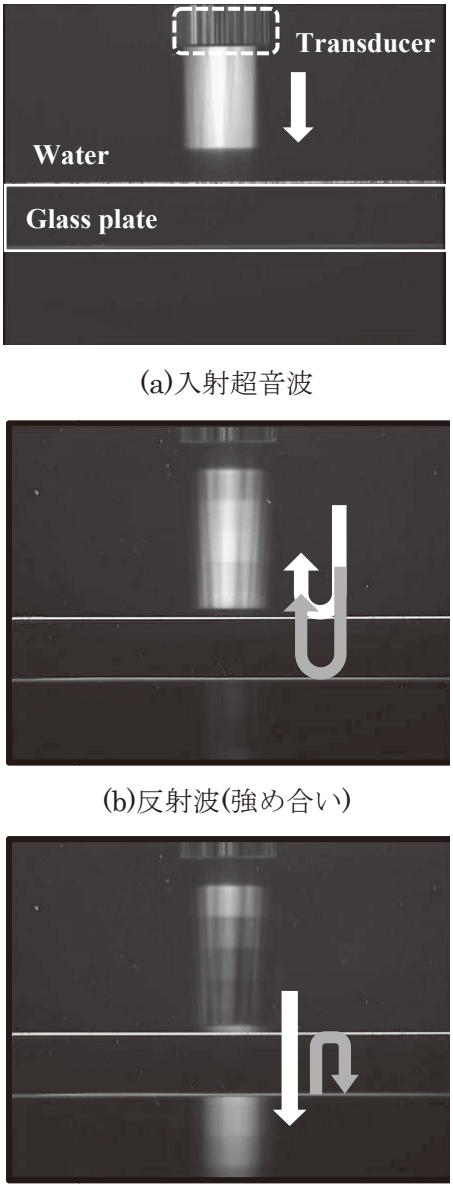


Fig.1　schlieren 光学系

3. 可視化結果

Fig.2 に長方形ガラスにおける超音波の干渉を schlieren 法によって可視化した像を示す．共振周波数 10 MHz，直径 11.7 mm の超音波振動子を上部に設置し，その下方に長さ 150 mm，奥行き 40 mm，厚さ 10 mm の長方形ガラス(BK7)を配置した．Fig.2(a)は，超音波振動子からトーンバースト波が下方へ伝搬し，ガラス平面に向かって垂直に伝搬している様子である．この光学系では，超音波の音圧が高いほど，明るく可視化できる．また，ガラス内の超音波は可視化していない．

周波数 10.05 MHz の時，Fig.2 の(b)に示すようにガラス上面の反射波とガラス内部で反射した超音波が強め合いの条件で干渉している様子である．透過波は弱いためにほぼ確認できない．一方，入射超音波の周波数が 9.95 MHz の時，Fig.2 の(c)に示すように弱め合いの干渉が起こり，反射波が暗く，透過波が明るくなった．ここで，反射波に注目すると，(b)(c)ともに干渉が段階的に起こっていることが分かる．これは，表面反射と内部の多重反射の経路差があるためである．また，透過波にも同様の現象が見られる．



(a)入射超音波

(b)反射波(強め合い)

(c)反射波(弱め合い)

Fig.2　長方形ガラスにおける干渉

4. まとめ

長方形ガラスにおける超音波の干渉の可視化に成功した．強め合いの条件のとき，反射超音波の明るい可視化像が得られ，弱め合いの条件の時には，暗い像が観察できた．トーンバースト波を用いているため，定常的な干渉ではなく，干渉の段階的な形成過程も理解できるビデオ教材である．本教材は，教員を目指す学生が教育現場で実際に使用するために作成した．

参考文献

[1] 池山美波，清水健人，中田望，山本健，「超音波の全反射とエバネッセント波の可視化」2016 年度日本物理教育学会年会第 33 回物理研究大会発表予稿集，91-92

[2] 加納康裕，中島萌，筒井和幸，本管正嗣，幾見優子，山本健，「超音波を用いたビデオ教材の開発―凹面鏡で反射した波動の振る舞い―」2016 年度日本物理教育学会年会第 33 回物理研究大会発表予稿集，89-90

[3] 加納康裕，清水健人，江口悠介，筒井和幸，本管正嗣，淺川誠，鈴木直，山本健，「超音波を用いたビデオ教材の開発―ホイヘンスの原理に基づいた波動の集束―」2015 年度日本物理教育学会年会第 32 物理研究大会講演予稿集，135-136

2017 年度日本物理教育学会年会第34回物理教育研究会発表
ローレンツ力による金属細線のたわみと共鳴振動

神戸大学　大教推進[1], 工[2], 理[3]　絹川亨[1], 安廣佑介[1], 本間康浩[2], 園田英徳[3]
E-mail　kinugawa@phoenix.kobe-u.ac.jp[1]

１．序

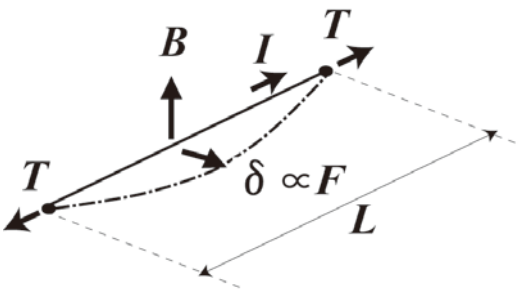


図１　原理

神戸大学では教養の物理学実験テーマの「ローレンツ力と金属線の共鳴振動」を自作で始めて 17 年に及ぶ。現象は非常に単純である； 図１のように、固定端間の距離が L である金属細線にネオジム磁石での磁場 B と錘による張力 T を加えた状態で電流 I を流すと、ローレンツ力 F（$=BIL$）でたわみ δ が生じる。全２回の実習では、第１週目には直流電流で生じるたわみ量 δ をデジタル顕微鏡で測る。第２週目には同様の配置で交流電流に切り替えて、弦の共鳴振動を観測する。理工系以外の学生向けで始まって全学向けへと拡大改良してきたが、今後の興味深い課題についても言及する。

２．原理と方法

図１の原理は小学生も定性的に知っている内容で、中学生はフレミングの左手の法則で習うはずである。さらに、背景理論を調べたところ、センター試験レベルの知識だけで理解できることが判明して、2000 年からの実施開始へとつながった。

第１週目は（弦の中心での）たわみ量 δ に関する以下の式を実測で検証することになる。

$$\delta/L \quad = F/(8T) \quad = BIL/(8T) \qquad (1)$$

(1)式では両辺ともに無次元量であるが、簡単な微分方程式（一般解が２次関数）だけで導ける。この検証法の動機は δ が裸眼で見えて、まさに“力が働いている”のが実感できるからである。

第２週目は音響分野での弦の共鳴振動と基本的には同一であるので詳細を割愛するが、２つの独自性を盛り込んだ。(i) 角周波数 ω の駆動力を交流電流と定常磁場との間のローレンツ力で得る 、(ii) 振動を（誘導）逆起電力で検出して電気的に確認する。ただし、共鳴の確認は、低次の振動モードについてはルーペ観察でも可能で、学生には体験を積極的に勧めている。

３．装置の実例

たわみ測定装置は図２のようになる。本体は DIY センターで購入可能な物品で作製するように努めていて、錘も M12 のボルトとナットを使う。安全のため、２回の実習では（同じ実験台上にあ

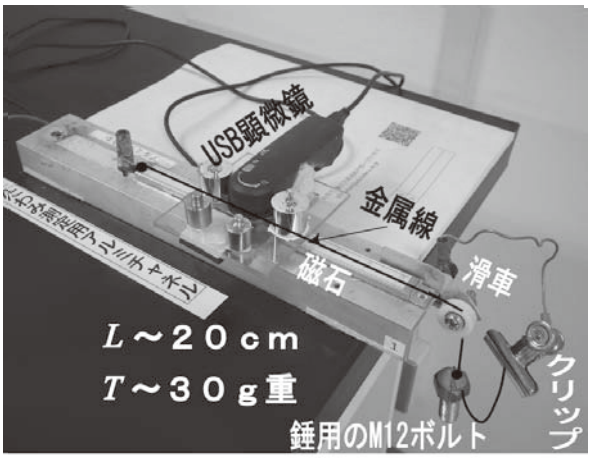


図２　たわみ測定装置

る）別々の装置を使い分けている：たわみ測定で使うネオジム磁石は特注品で、その吸着力は約１００ｋｇ重にも及んで、不慮の事故を防止するためにも固定する必要がある。

開始当初は、“学生自身の手作り”という基本方針で半田付け配線を課してきたが、5 年前に廃止した。代わりに、金属細線を単に結んで（文房具の）クリップでの導通確保に切り換えた。

４．測定画面

測定中の PC 画面を示すとたわみ測定では図３、共鳴振動では図４のようになる。

たわみ測定では、背後のスクリーン・トーン像から算出すると、液晶画面上で 50 倍程度に拡大表示されていて、最小電流 50mA でのたわみ量は３０ピクセル以上にも広がることになる。

共鳴振動では、自作の差動増幅器（200 倍）からの電気信号を USB 接続のステレオ音声入力機器でデジタル化して、最終表示は図４のようになる。これは LabView7.1 で自作したソフトの画面で、時間波形とリサジュー図形を同時に表示することで、共鳴状態の有無を一目瞭然としている。

以上の観察をもとにして、理論予測値と測定値との比較を学生には行わせているが、現状での誤差はたわみ測定では１０％程度、共鳴振動では１％以下といったところであろう。当日の発表では、実際の授業で得られたデータを示す予定である。

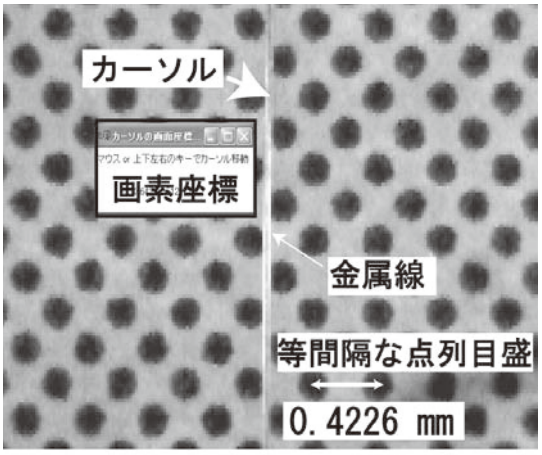


図３　USB顕微鏡の画面

５．短いまとめと今後の課題

（自作の弱点である）安全性や信頼性の確保でかなりの年月を費やしたが、デジタル技術の進歩・普及が追い風となって、何とか完成に近づけた。また、以下のような興味深い２つの発展課題にも気づいたが、詳細は当日発表に譲る：

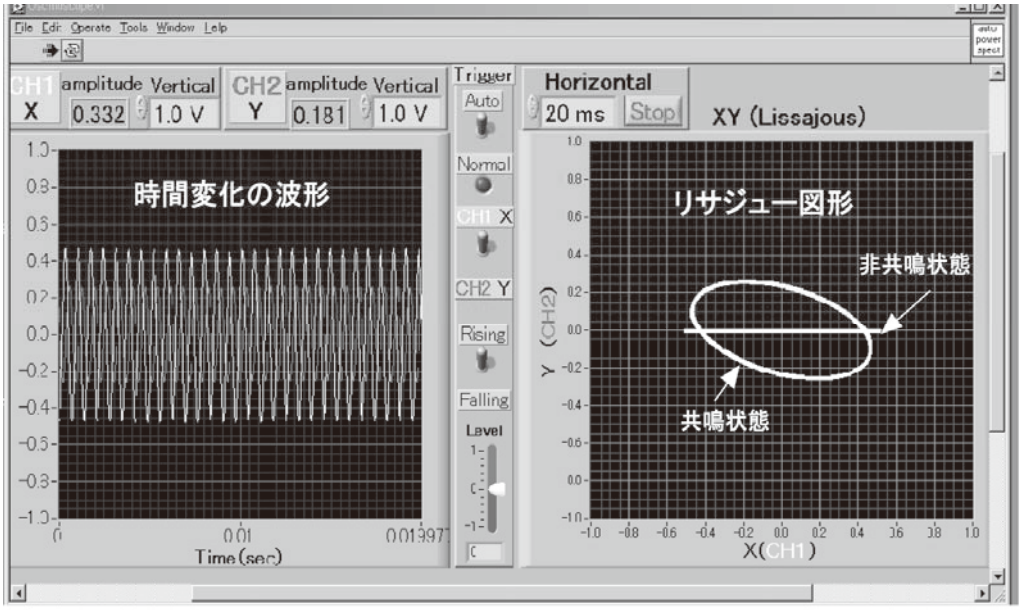


図４　共鳴測定の画面

（i）　細線のたわみでの静電気力の測定、（ii）共鳴振動での重力加速度 g の決定。

探究型生徒実験の実践例

慶応義塾高等学校　小河原康夫
E-mail: ogawara@hs.keio.ac.jp

1.　はじめに

2014 年 4 月から 1 年間、米国 California State University, Fullerton に客員研究員として研究留学する機会をいただいた。その期間中、AAPT(American Association of Physics Teachers)[1]の Winter Meeting である Workshop に参加してみたところ、非常に興味深いいわゆる「探究型」の生徒実験が次々と紹介された。その中から、多少のアレンジを加えて 2 年物理基礎の授業に導入した実践を報告したところ、研究報告として物理教育誌に掲載された[2]。

今回は、その授業の様子をご紹介するとともに、昨年から始めた 3 年物理での取り組みもあわせてご報告し、探究型実践にご興味をお持ちの先生方と意見・情報交換を行いたい。

2.　2 年物理基礎における探究型生徒実験

物理教育 64-1 号に掲載された探究型生徒実験は、2 年物理基礎の「力の合成と分解」の授業後に行う「片側固定の橋製作」という課題についてである。直前の授業内容を利用するのだろうとは感じていても、生徒諸君にとっては未知の体験であるようで、試行錯誤の様子は何とも微笑ましい。昨年までは、授業の冒頭に実験プリントを配布し、新聞紙 2 枚とセロテープ 30cm のみ使用可能で、50g のおもりまでの水平距離を競うなどのルールを説明していたが、その場で 3 名の班員同士が相談していると、製作時間が短くなってしまうこともあり、今年度からは事前に実験プリントを配布した。その結果、前もって個々人で練った構想を持ち寄るところから始めることになり、全体的に製作時間を多く取れるようになった。感想欄には「考えることが楽しかった」など、非常に肯定的なものが多く、能動的な学びが多くの生徒に歓迎されていることがうかがえる。当日は、生徒の提出した実験プリントなどを交え、授業の様子をご紹介する。

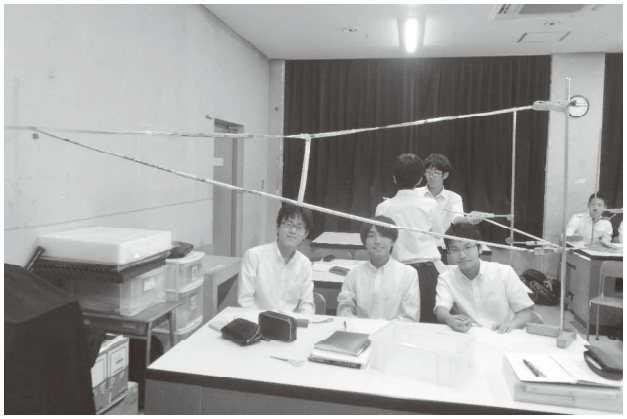


図 1 今までの最高記録 226cm

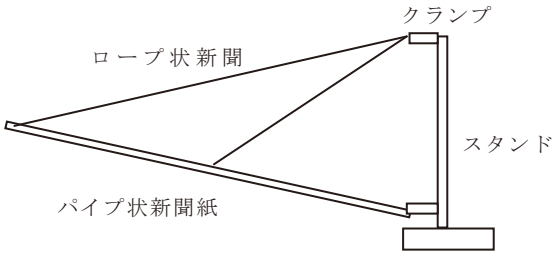


図 2 実験後に提示する製作例

３．　３年物理における探究型生徒実験

2 年物理基礎の実践に手ごたえを感じ、昨年から 3 年物理でも探究型生徒実験の試行を始めた。テーマは、「滞空時間の長い熱気球の製作」である。ボイルシャルルの法則の現象への適用例として、授業で理論を扱った後、各班で製作させた。問題集などで、熱気球の問題を見かけるが、問題が解けることと、浮上し始める温度の条件式からどの物理量をコントロールすればよいのかを考えることは少し異なるようで、必ずしも成績の良い生徒達の班が実験に成功するとは限らない。

橋の製作では、使用できる材料は全ての班で同じとしたが、熱気球では市販の厚さ 0.011mm の 45ℓゴミ袋（図 3）と糸をつけること（熱気球の動きをコントロールする目的）だけを共通とし、残りの材料は教卓上のものから自由に選べることとした。固定観念からか、よく見かける熱気球のように、ゴミ袋の口を窄める班が見られるが、体積は大きいほうが浮力は大きくなって有利である。また、ビニールが炎に近いと収縮してしまい、墜落の原因となってしまう。

メタノールを染み込ませた脱脂綿をアルミカップに載せ、それを固定する材料として、ストローと針金を用意しておくと、最初は軽いと思い込んでストローを選択する班が多いのだが、ストローは引火しやすく、墜落してしまうことが多い。用意した針金は、同じ長さでストローと同じ質量であり、計量して気付いた班は針金を選択している。

実験プリントには、浮上した瞬間の温度、浮上中の最高温度、降下しはじめた温度を記録させる。すると、計算した浮上するための理論値（私の試作機では 207℃）と、実際に内部を測定した温度（私の試作機では 122℃）で、後者が相当に低いことが判明する。それはなぜかを考察させ、レポート課題とする。浮上し始める温度の条件式を吟味していくと、その理由が絞られてくるのだが、聡明な読者の先生方には簡単な問題だろうか。

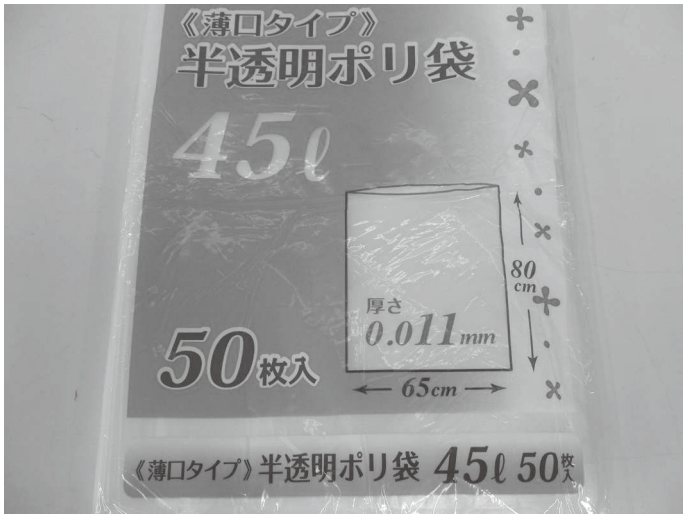


図 3 実験に使用した市販の薄いゴミ袋

参考文献

1) http://www.aapt.org/

2) 小河原康夫：物理教育 64-1(2016)9-11.

高校科学部と連携した、ペットボトルロケットの飛び方と内圧に関する研究

宇都宮大学大学院教育学研究科[1], 南　伸昌[1], 高橋　涼太[1]
E-mail　minami@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1．はじめに

ペットボトルロケットの飛行能力に与える、水量、内圧の影響を調べ、高校生にも最適化の条件が理解できることをねらいとして、県立高等学校の理科教諭、科学実験クラブと連携し研究を行った。今回は、飛行能力を評価する指標として「滞空時間」に着目し、その有効性を示す結果が得られたので報告する。

2．実験結果

実験は、高校と大学とでそれぞれ行った。高校では、2 年生の物理の、「運動量」の授業における生徒実験として、1.5 L ペットボトルロケットに羽を付け、市販の発射台を用いて約 45°の角度で発射した。水量と内圧をパラメーターとし、内圧は空気を注入するポンプのゲージ圧で、3 気圧と 6 気圧で行った。滞空時間は、発射から接地までの時間をストップウォッチで計測した。6 気圧の場合の、水量と滞空時間との関係を図 1 に示す。

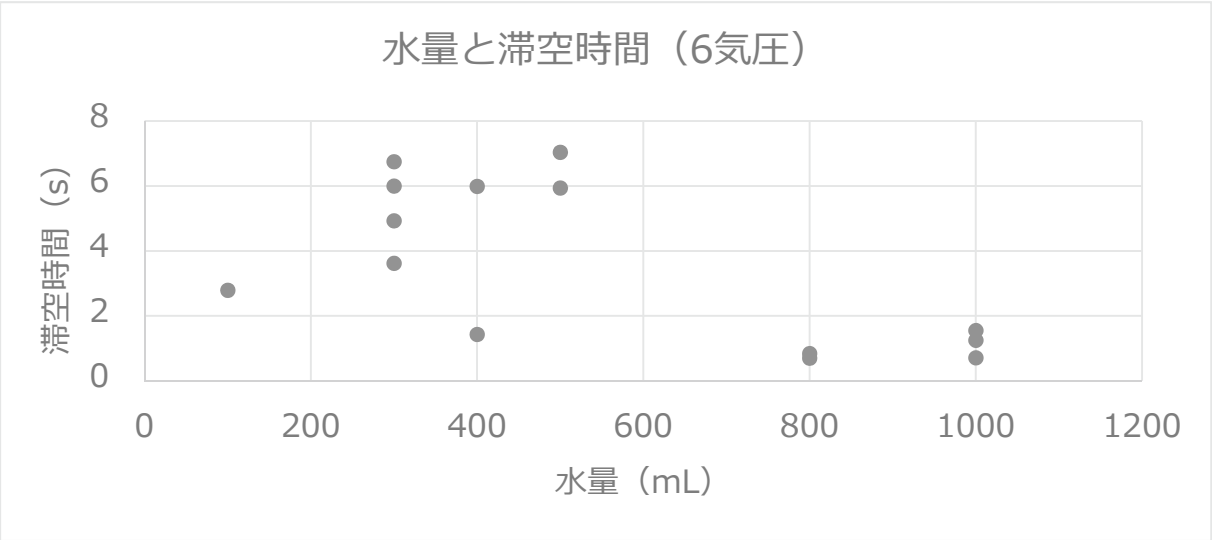


図 1　6 気圧の場合の水量と滞空時間との関係。

グラフから、水量 400 mL 付近に滞空時間のピークがあるように見えるが、明瞭とはいえない。これは、発射したロケットの軌道に大きく左右されたためである。同じ水量でも上向きに進んでいくものもあれば発射直後に地面に叩きつけられるものもあり、滞空時間が大きくばらつく結果となってしまった。3 気圧のものも同様に、捉えどころのないデータであった。

そこで、大学において、「鉛直方向打ち上げ」と「羽なし」2 点の改善を行った。鉛直方向に打ち上げた場合、滞空時間に寄与するのは運動の鉛直方向成分だけなので、横風に流されても影響はほとんどない。また、落下時の、所謂「風に乗る」状態は滞空時間に与える影響が大き

いので、羽は付けず、先端に空気抵抗を減らすためのキャップを付けただけにした。(図 2)

このロケットの内容積は 530 mL、ノズル装着時の質量は57.0 gであった。発射台は自作のものを用い、発射時の地面からノズルまでの高さは 25 cm で、滞空時間は高校と同様に、ストップウォッチで計測した。空気ポンプのゲージ圧を 5 bar にして、水量を変えて滞空時間を計測した結果を図 3 に示す。

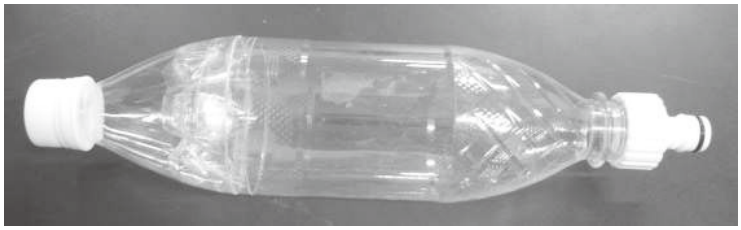


図 2　改良版ロケット

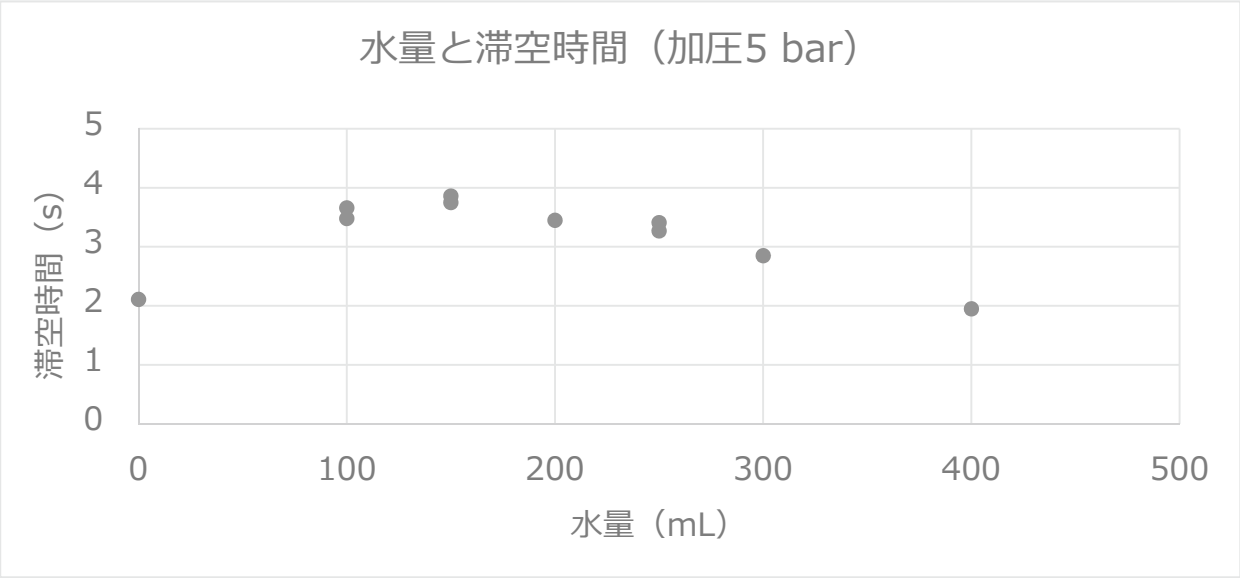


図 3　改良版ロケットによる、水量と滞空時間との関係。

高校で実施したものと比べてデータが揃っており、水量 150 mL 付近にピークがあることが判った。

３．まとめ

鉛直方向打ち上げで、滞空時間を計ることにより、500 mL ペットボトルロケットにおいて、ゲージ圧 5 bar での最適な水量が約 150 mL であることを、実験的に示すことができた。各種実験結果やシミュレーションから、この圧力での最適水量は全体の 1／3 程度と言われているが、をれを実験的に明瞭に示すことができた。他の圧力でもデータを集め、内圧変化の計測結果と併せて、高校生が納得できる説明の検討を進めていきたい。

単極回転・単極誘導の実験

秋山和義
E-mail:　quork@kba.att.ne.jp

1　はじめに

単極誘導とは磁場の中で回転する導体円盤に起電力が生じる現象である。これには磁石が静止している場合と，磁石が導体円盤に固着されて一体となって回転する場合の 2 通りがある。単極回転とは磁場の中で導体円盤に電流を流すことで回転を起こす現象である。単極回転にも導体と磁石が一体の場合と，導体のみ回転する場合の 2 通りがある。この実験では単極回転によって回転を起こし，電流を切ったのちの惰性回転によって単極誘導を起こす方法を用いる。今回の実験装置は筆者が以前に発表した実験[*1]を改良して，測定を容易にし実験内容を追加したものである。この装置によって

1, 磁石と一体で回転する場合と，磁石は静止して導体円盤のみ回転する場合の二通りの単極誘導で同じ起電力が生じること

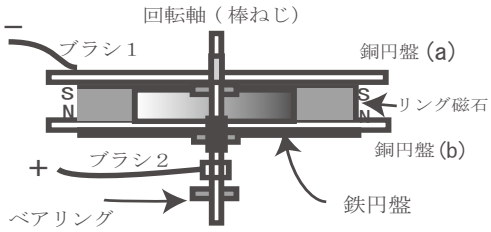
2, 導体円盤の回転速度と起電力が比例することを簡易に検証できるようになったこと

3, 軸対称磁石が軸の周りに回転するとき近接して静止した共軸の導体円盤には起電力は生じないこと

4, 磁石と導体円盤が一体となって回転を起こすとき, その回転力（力のモーメント）の逆の回転力が存在することを同時に逆回転を起こすことで実証し，単極回転において角運動量保存則が成り立つこと

などが確認できた。

2　実験装置と実験の概要



回転子の断面図

装置全体写真

図 1

使用した磁石はネオジム磁石の一種で”ネオマックス磁石”の商品名で市販されているもので，内径 6cm，外径 10cm，厚さ 1cm のリング形である。

１、単極誘導の実験 1（銅円盤と磁石が一体となって回転する場合）

銅円盤と磁石を圧着した回転部（回転子）を図２で示す。写真では回転子はベアリングで支えられており自由に回転できる。上部円盤 (a) の周縁と軸の間にブラシを通して 20 A～50 A の電流を通すと回転子に単極回転が生じる。回転数は最大 4000RPM となり，安全のため透明プラスチックの箱の入れている。回転数は上がった後, 電源に接続していた端子をデジタル電圧計に切り替えて慣性で回転を続ける回転子に生じる起電力を測定する。回転数が落ちるにしたがって起電力は減少する。回転数は非接触回転計，起電力はデジタルテスタの各表示をデジタルカメラ（またはスマートホン）で同時に録画する。

[*1] 物理教育 41-1(1993)

２，単極誘導の実験２（磁石が静止して銅円盤が回転する場合）

上記回転子の磁石を回転しないように固定し，上部の銅円盤をベアリングで支えて自由に回転できるようにする。その円盤の周辺にブラシを接触させて１，と同様に電流を通じると銅円盤のみ回転する。測定は１、と同様である。

３，単極誘導の実験３(磁石が回転して銅円盤が静止している場合)

上部回転円盤を別の固定銅円盤に交換し，回転子の磁石が自由に回転できるようにして図１のようにブラシを銅円盤 (b) と軸に接続すると磁石は回転する。そのとき上部に固定した銅円盤中心と周辺の間の起電力を測る。

４，逆回転を同時に起こして，逆トルクの存在を見る実験

右図２のように，再び回転子を回転できる状態にして，軸のブラシを上面に設けた銅円盤 (a) の周縁に移して，上部銅円盤 (a) 周縁から下部銅円盤 (b) 周縁に向かってから通電する。すると磁石は回転を始めると同時に，その上に設けた銅円盤は逆回転を始める。このことから単極回転の逆トルクが存在することがわかる。

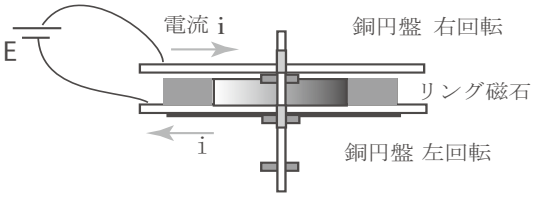


図２　回転子の断面図

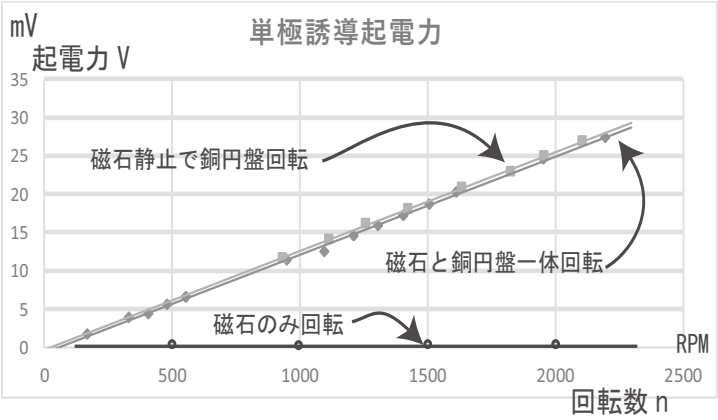
3　回転数と起電力の関係

起電力 V は次の式で与えられる。

$$V = \pi n B a^2$$

ただし B; 平均磁束密度　n; 回転数，a; 円盤半径である。

測定結果の右グラフから V と n の比例性は明らかである。また，磁石と一体で回転する場合と銅円盤のみ回転する場合で起電力はほとんど一致することが分る。また，銅円盤が静止しているときは磁石が回転してもその回転によらず起電力は生じないことが分る。なお円盤半径 5.0cm として計算すると，平均磁束密度は 0.11T となった。



4　おわりに

本装置によって，単極誘導の定量的実験が確実にできるようになった。理論的には，単極誘導起電力は，”ファラデーの電磁誘導”の法則における運動する導体に生じる起電力として説明できる。一方この誘導起電力は運動する導体内の電子に働く”ローレンツ力”でも説明できる。いずれにせよ磁場内で運動する導体に現れる起電力は高校の演習問題でもしばしば出てくるのでその良い実験教材になる。

単極回転に関しては，電流の流れる導体が逆回転することから角運動量が保存されることに疑いはないが，だからといって電流の直接の相互作用と考えることはできない。なぜなら一方の電流が受ける力は他方の電流の作る磁場ではなく，磁石の作る磁場からだからである。すなわち磁石は力を受けないが磁石の作る磁場を媒介として，電流間に作用・反作用の関係の力が働くと考えられる。

単極回転・誘導の実験は”運動物体の電磁気学”に関する興味深い実験である。

中・高・大学生による科学解説イベントの運営と活動を通じた成長過程

大阪市立鶴見商業高等学校，川口喬[1]
E-mail　kawa-sun_good-sun_takashi-sun@live.jp[1]

１．はじめに

「科学館大好きクラブ（ＫＤＣ）」は，中学生・高校生・大学生が中心の市民サークルである。2004 年の発足以来，楽しみながら自然の不思議を探究し，自分たちの研究成果や科学の素晴らしさを，多くの方と共有するため，大阪市立科学館で展示物の解説や演示実験を行うイベントを行ってきた。これらのイベントは基本的に大学生が中心となり中学生・高校生をサポートしながら，自律的に開催している。本発表では，中学生・高校生・大学生が主体的に活動し，イベント開催に至るまでの組織運営と，それを通じて学生たちがどのように成長できたと感じるかを紹介する。

２．ＫＤＣの活動

ＫＤＣは大阪市立科学館で年３回（８月「青少年のための科学の祭典大阪大会（別会場として実施）」，11 月「自然科学の基礎を訪ねる」，３月「科学館ナビ」），展示物の解説イベントを開催している。それぞれのイベントは開催時期から「夏大会」，「秋大会」，「春大会」と略して呼んでいる。

大会当日はまず，イベントの参加者集めから始める。科学館の入り口付近に受付を設け，自作のチラシを使って来館者に参加を呼び掛ける。参加者はスタンプラリーの要領で，館内数ヶ所に設置されたポイントでＫＤＣメンバーから解説を聞き，カード集めをする。配布されるカードは解説内容に合わせデザインしたオリジナルのもので，すべてのカードを集めた参加者には受付で記念品を渡している。記念品もメンバーでデザインしており，子どもでも安全に工作できるように作り方や仕組みを書いたプリントも添付している。また，中学生以上の参加者にはアンケートに協力していただいている。

このような３大会を開催するため，ＫＤＣは月１回のペースで会合を行っている（ただし，５月は中学生・高校生の定期考査が重なるため，解説班別に実施）。４月の第１回会合で年間活動計画を策定し，解説班と解説内容の決定，その他の役割分担（チラシ作成，アンケート作成，記念品準備，メンバー用弁当手配などの役割がある）を行う。以降の会合では，解説内容の勉強，解説練習，解説内容の発表と相互評価，記念品準備，アンケート作成などを行う。また，３大会後の会合は反省会と称し，アンケート結果をもとに，解説内容の難易度や参加者の理解度を振り返り，より良い解説を目指して自己研鑽している。

その他にも，サイエンスセミナーと題し，ＫＤＣの大学生や院生が自らの研究を発表したり，大学や企業の研究者等を招いて講演していただいたりすることもある。また，アンケートの分析結果は研究報告として大阪市立科学館研究報告に掲載していただいている。

３．ガイドスタッフとアドバイザー

ＫＤＣでは中学生・高校生・大学生のメンバーをガイドスタッフ，大学院生・社会人のメンバーをアドバイザーと呼んでいる。そして，ガイドスタッフが運営のほとんどを担い，アドバイザーは基本的にガイドスタッフの活動を見守っている。

会合であれば，会合の進行計画を立て，連絡を回すことから始まり，レジュメの作成や司会進行，参加者の記録，会計などを大学生が行っている。また，チラシやカードの作成，お弁当の手配，記念品の袋詰めなどは高校生や中学生が手伝うこともある。

解説内容の決定も大学生を中心とする班員で決める。大阪市立科学館にある展示物から自分たちが興味を持ったものを選び，小学生以下の子どもにも伝わるような平易な表現や小道具に工夫を凝らして解説を作り上げていく。ただし，解説内容の科学的正確さや利用する小道具の工夫，解説で使用する言葉選び，参加者の学習状況などはどうしてもアドバイザーの援助が必要になってくる。そこで，会合の最後に班ごとに解説内容の発表や模擬解説を行い，アドバイザーや他のガイドスタッフが様々なアドバイスを出し合って，お互いの科学的内容の理解を深め，解説の質を高めていく。

大会当日は基本的に，ガイドスタッフはガイドに集中し，受付での参加呼び掛けや記念品の受け渡し，アンケート回収などはＫＤＣのＯＢ・ＯＧや中高生で当日だけ参加できる人に担当してもらっている。ただし，集まったアンケートの集計，分析，反省会での発表などは大学生が担当する。また，研究報告の執筆も大学生が行い，アドバイザーのチェックを通過するまで何度もやり取りすることになる。

４．ＫＤＣでの成長

ＫＤＣに参加した学生たちは，学校で得ることのできない多くの経験から成長を実感し，自信をつけていく。例えば，学校では同世代の生徒や教員と接することはあっても，社会人や初対面の子どもとその保護者らと会話する機会はほとんどない。しかしＫＤＣでは展示解説を通じて様々な方と語り合い，科学の原理と意味を伝えなければならない。わかりやすい解説をするためには原理を理解し，伝える内容をまとめ，声の大きさやジェスチャーを意識し，相手の年齢や表情から解説内容を臨機応変に変える必要がある。もちろん初めて解説するときは緊張してうまく話せないが,何度も繰り返すうちにスムーズに解説できるようになり,「わかった！」や「ありがとう！」という言葉をいただけるようになる。この言葉が学生たちに達成感を与え，自信をつけさせる。そして，より良い解説をするために知識を深めるだけでなく，コミュニケーションに対する意識の変化を実感するようになる。さらに，組織を運営したり、自ら企画したことが実現していったりする過程で，大事な役割の一端を担うことのやりがいを感じ、責任感を持つようになっていく。このように学校生活だけでは味わえない経験を通じ，自己の成長と意識の変化を実感できることがＫＤＣでの活動の醍醐味である。

参考文献・参考 URL

大阪市立科学館ガイド解説書 2011 年度（下記サイトの活動内容に掲載）

科学館大好きクラブ http://www2.hamajima.co.jp/~fhert

Advancing Physics A2に見る熱概念

東京理科大学　理学部　　五十嵐　靖則
igarashi-yasunori@nifty.com

1 はじめに

構成主義学習理論の立場から、オグボーンらが著した Advancing Physics A2 では、学習者に誤概念を誘発しやすい“heat”の用語の使用を避けて、それに代えて“thermal”の用語を用いている[1)]。即ち、Advancing Physics A2 に於ける熱概念の Key Concepts は“thermal”である。この鍵概念である“thermal”をどう理解するかが、このテキストを理解する大きな手がかりとなる。身近な物理現象や超低温や超高温にある物質の性質を説明する理論として、熱力学法則や分子運動論の有用性などについて分かり易く説いている。その際、著者たちは初学者に対して誤概念を誘発しないよう教育的配慮をして、使用する用語を厳選して使用している。日本の物理教育の現代化の参考点などを紹介する。

2 Advancing Physics A2 に見る“thermal energy”や“thermal motion”、“thermal agitation ”等の使用例

このテキストを理解するための鍵となる、次の文章から始めることにする。

1 P.99～100（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）の記述

> **The energy to make things hotter**
>
> Energy transferred = mass of substance × a constant for that substance × temperature rise …
>
> $\Delta U = mc\Delta\theta$
>
> We have decided to call the constant c the specific thermal capacity※. (Its more usual name is specific heat capacity, but that suggests the old idea that ‘heat’ is the energy inside matter.) …　　（※印と下線は筆者による。）

著者たちが‘heat’の使用を避けて、‘thermal’を使用する理由が、上記文章の（　　）内に記されている。（　　）内を訳すと、『より一般的な名前は、比熱容量であるが、しかし、この名前は、「熱」は物質内のエネルギーという旧い考えを示唆する。』となる。熱は物質内部には存在しないので、「比熱容量」の使用を避けて、「比温度的容量」という用語を使用している。日本語版のこの章の訳者は、著者たちの誤概念を誘発する用語の使用は避けるという教育的配慮を理解しないで、誤解して、specific thermal capacity を『比熱容量』と訳し、（　）内を『比熱の方が一般的なのであるが、これは熱が物体内のエネルギーであるという古い考えを連想させる。』と誤訳していることを指摘しておきたい[2)]。日本語版では thermal を全て 熱と訳されている(著者たちの意図が理解されていない)が、温 或は温的又は温度による が適切である。

2 P.93（13. Matter : Very Simple の 13. 2 The kinetic model）の図の説明文

> **Kinetic energy of gas molecules and the Boltzmann constant**
>
> Boltzmann constant k　　random thermal energy of one molecule is of order kT　　（下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、「乱雑（無秩序）な温度によるエネルギー」であり、「ランダムな熱エネルギー」ではない。

3 P.98（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）の説明文

> The energy inside matter is simply the energy of random thermal motion of particles.…（下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、熱は物質内部には存在しないので、「温度による運動」であり、「熱運動」は適切ではない。

4 P.98（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）の図の説明文

> **Transfers of energy to molecules in two ways**
>
> Hit the molecules yourself　work done = force × distance　　Let other molecules hit them　thermal transfer = $mc\Delta\theta$
>
> energy transferred = work W done　　energy transferred = energy Q transferred thermally
>
> change in internal energy ΔU =
>
> ↳ work done W　　plus　　thermal transfer Q ↲
>
> $\Delta U = W + Q$　　（下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、「温度的伝達」であり、「熱伝達」ではない。「温度的に」であり、「熱的に」は適切ではない。

5 P.99（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）に

> If not, the gas molecules gain or lose energy until they are. The spontaneous flow of energy from hot to cold is called a *thermal transfer of energy*.
>
> The internal energy can change in both ways at once. If it dose, then
>
> change in internal energy of material = work done on material + energy transferred thermally
>
> $\Delta U = W + Q$　　（下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、「エネルギーの温度的伝達」であり、「エネルギーの熱伝達」ではない。「温度的に伝達されたエネルギー」であり、「熱的に伝達されたエネルギー」ではない。energy transferred thermally= transferred thermal energy

6 P.100（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）に

> How much energy to have a bath ?
>
> energy required = mass of water × specific thermal capacity of water × temperature rise
>
> $\Delta E = m \cdot c \cdot \Delta\theta$ … ΔE =19 MJ （下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、著者たちの意図を考慮すると、「比温度的容量」であり、「比熱容量」は適切ではない。

7 P.101（13. Matter : Very Simple の 13. 3 Energy in matter）に

> Molar thermal capacity
>
> …The energy of thermal agitation inside *any* kind of mater is some fairly small multiple of the quantity kT. …..
>
> …The random energy kT of thermal agitation is about 1/40 of an electron volt, 1/60 of the energy an electron gets from a 1.5V torch battery. （下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、熱は物質内部には存在しないので、「温度による運動」であり、「熱運動」は適切ではない。

8 P.105（14. Matter: Very Hot and Very Cold の 14.1 The magic ratio' ϵ/kT）に

> Matter is made of an enormous number of particles in continual random thermal agitation. This fact decides the forms in which matter exists at different temperatures, and the changes which can occur to them. …（下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、熱は物質内部には存在しないので、「乱雑な温度による運動」であり、「ランダムな熱運動」は適切ではない。

9 P.107（14. Matter: Very Hot and Very Cold の 14.1 The magic ratio' ϵ/kT）に

> A simple general rule links the behavior of matter at all temperature. Particles, in all kinds of matter, have an average energy of random thermal agitation of the order of magnitude kT, at an absolute temperature T in kelvin. …
>
> 図の最上段に Energy of particles ≈ kT
>
> 図の最下段に At temperature T, particles have random thermal energy of the order of kT （下線は筆者による。）

下線部の正しい訳は、熱は物質内部には存在しないので、「温度による運動」であり、「熱運動」は適切ではない。また、図の最下段は、「温度によるエネルギー」であり、「熱エネルギー」は適切な訳ではない。

3 考察とまとめ

(1) Advancing Physics A2 の目次は、Matter in Extremes 13.Matter:Very Simple 14.Matter:Very Hot and Very Cold で、熱力学法則や分子運動論が展開され、14.4 The Boltzmann factor exp(ϵ/kT）の章で、ボルツマン因子にまで及んでいる。

(2) 「はじめに」の所で述べたように、構成主義の立場から著された Advancing Physics A2 は、学習者に誤概念を誘発しやすい "heat" の使用を避けて、"thermal" の用語を用いている。「熱」はエネルギーそのものではなく、エネルギーの移動量に付された名称に過ぎないので、実態は何もない。英語圏では、「熱運動 (heat motion)」や「熱エネルギー (heat energy)」という用語は既に死語となっている[3)]。それらに代わって、Thermal motion（温度による運動）や thermal agitation（温度による擾乱）、random motion（乱雑な運動）、thermal energy（温度によるエネルギー）、temperature energy（温度エネルギー）等の用語が 1930 年代頃から使用さている[4、5、6)]。文献７）の頁９の第２章に 2 First law of thermodynamics 2.1 Zeroth law and scale of temperature に続いて、次の記述がある。

> The most directly accessible thermal concept is not heat (which will be discussed in Section 2.3) but rather Temperature, the relative sensations of hot and cold. （下線は筆者による。）

ここに、thermal の物理学的意味は**熱ではなく温度である**と明確に述べられている。文献５）には temperaturbewegung が使用されている。この事実を解さないで、「thermal motion」や「thermal energy」を「熱運動」や「熱エネルギー」と訳すことは、国際的に遅れを取っていると云える[8)]。初学者に誤解や混乱を起こさせないため 熱概念に関わる物理用語の現代化が急務である。

4 参考文献

【※註】文献3)に紹介した Çengels は、specific heat capacity に代わって specific energy capacity を提案している。

1）Advancing Physics A2 edited by J. Ogborn & M. Whitehouse IOP Pub. 2001, Revised ed. edited by J. Ogborn & R. Marshall IOP Pub. 2008

2）アドバンシング物理Ａ２ Ｊ.オグボーン/ ホワイトハウス 編 笠 耐/ 西川恭治/ 覧具博義 監訳 ｽﾕﾌﾞﾘﾝｶﾞｰ･ﾌｪｱﾗｰｸ東京 2006 年

3）五十嵐 靖則 英語圏に見る熱概念の変遷と進化 日本物理教育学会 第３２回物理教育研究大会発表予稿集(2015. 8) 107-108

4）五十嵐 靖則 熱概念の本質を見抜き、初学者向けに著されたテキストについて 日本物理教育学会 第３１回物理教育研究大会発表予稿集(2014. 8) 133-134

5）R.de L. Kroning Beziehungen Zwischen Molekülbau und Kristallbau Handbuch der Physik Zweite Auflage Band XXIV Springer (1933)253-332

6）五十嵐 靖則 熱概念の進化と日本の理科・物理教育の今後の在り方について 東京理科大学教職教育研究 創刊号（第１号）(2017. 3) 111-120

7）P. C. Riedi Thermal Physics An introduction to thermodynamics, statistical mechanics, and kinetic theory 2nd. Ed. Oxford Univ. Pre. 1988, P. 9

8）五十嵐 靖則「熱エネルギー」「熱運動」という訳語は適切か-英語圏のテキストを調査して判明したこと- 日本物理学会講演概要集 Vol. 72No. 1 (2017. 3)

科学的推論能力の育成に着目した高校物理授業の効果２

京都市立伏見工業高等学校[1]，京都教育大学[2]　　山下 哲[1]，谷口 和成[2]
E-mail:　haz34840@wood.odn.ne.jp[1], guchi@kyokyo-u.ac.jp[2]

１．CASE とその効果

英国で 1980 年代に開発された，科学教育を通して小・中学生の認知発達を加速させることによって論理的思考力を伸長させるプログラム「CASE（Cognitive Acceleration through Science Education）」は児童・生徒が具体的な操作・議論の反復を通じて，ピアジェの言うところの具体的操作期から形式的操作期への認知発達を加速させることを目的としたプログラムである[1]。CASE は具体的準備・社会的構成・認知的葛藤・ブリッジング・メタ認知を指導原理とした生徒間共同活動の体裁を取るが、CASE によって児童・生徒のシェマの認知発達が促され，論理的思考力がよりスムーズに伸長されることが報告されており，現在，CASE の利用は世界的に広がっている。日本においては，これまでに義務教育課程を中心に実践的研究が行われ，その効果が報告されている[2]。

２．CASE と「CASE 的なはたらきかけ」による取組と効果

講演者は 2015 年度より、勤務校において高校 2 年生に対しては「物理基礎」，高校 3 年生に対しては「物理」と「地学基礎」の中で継続的に CASE を実施してきた。また、CASE のみでなく、「物理基礎」と「物理」の授業の中で、上述した 5 つの指導原理を通常授業にも取り入れた「CASE 的なはたらきかけ」も同時に行っている。これらの 2 年間の取組により、認知的発達段階の加速と生徒の学習に対する意識の変容、および科学的推論能力の伸長が確認されたことを報告してきた[3]。表 1 に本取組実施クラスの SRT task Ⅱによる発達段階の調査結果を示す。調査は 2016 年 4 月と 2017 年 2 月に行った。なお，2016 年度の 3－1 と 3－6 はそれぞれ，2015 年度の 2－1 と 2－6 が進級したクラスである．

表 1. CASE 実施クラスの発達段階の変化

	クラス　(人数)	実施授業	実施回数（全 30 回）	発達段階　(15 点満点)
2015 年度	2－1　(21 人)	物理基礎	13 回まで	
	2－6　(15 人)	物理基礎	11 回まで	
2016 年度	2－1　(16 人)	物理基礎	12 回まで	8.56(pre) → 10.68(post)
	3－1　(20 人)	物理　地学基礎	25 回まで	9.46(pre) → 12.05(post)
	3－6　(14 人)	地学基礎	23 回まで	9.35(pre) → 13.29(post)

発達段階の区分に関しては，Shayer[1)]らによれば，SRT task Ⅱの得点で 3~9 点を具体的操作期，10~12 点を過渡的段階，13~15 点を形式的操作期と分類している．表 1 から分かる様に，CASE の実施によって，各クラスともその発達段階が伸長していることが分かる．一方で，2015 年には発達段階の調査を行っていないが，おそらく，2 年次に「物理基礎」の授業を始める段階では，クラスの過半数の生徒が具体的操作期に留まっていたであろうことが推測される．具体的操作期の生徒にとって，教員がいかに丁寧

かつ論理的に説明しても，おそらく非常に冗長かつかつ抽象的なものとして受け取られる可能性が高く，生徒の発達段階を踏まえた授業を行う必要を示唆する結果と言える．

３．「CASE 的なはたらきかけ」による「物理」の授業の効果と課題

CASE による発達段階および科学的推論能力の伸長や、学習に対する意識の変容が「物理基礎」の学習に対して一定程度有効であることは、ペーパーテストの成績からも認めることができる[3]。しかしながら、生徒への個別インタビューなどから，3 年生で学ぶ「物理」で扱う様な、ある程度複雑かつ抽象的な概念を定量的に表現・操作するには課題があると言わざるを得ないのが現状である。すなわち、ピアジェの言う形式的操作能力と高校物理の学習で必要と思われる論理的思考力の接続を意識して行うことが不可欠であり、従来の取組よりさらに焦点をしぼった「CASE 的なはたらきかけ」を行う必要がある。このため、2017 年度 4 月より、「物理」の力学の単元について、学習内容の根幹となる部分の理解が CASE で用いる科学的推論能力の延長線に来る様に授業の設計を行い、「CASE 的なはたらきかけ」の取組をより実質化している。具体的には、単元ごとに過去 2 年分の定期テストの誤答分析を行うことによって、学習内容に関して生徒の多くが持つ素朴概念を特定し、具体的操作期の生徒でも参加することのできる形での生徒間の共同作業形式の取組を行うことによって素朴概念の解消をはかってから、各単元の内容の授業を行った。

「物理」における上記の「CASE 的なはたらきかけ」の効果については、生徒への個別インタビューより、学習に対する積極性が伸長したことを示唆するコメントはもちろんのこと、具体的な学習内容に関する自らの素朴概念への振り返りが実質化した旨のコメントが多数得られた。何よりも「物理について議論するときは、直感でこれを行ったときは間違うことが多く、図を書いて周囲と定義式を確認しながら行った方が、分かった時にはすっきりする」とか「複数の概念が使われているので、論理的に考えなければ分かったことにならない」といった定量化や論理性に関して言及する生徒があらわれたことが効果を物語っていると感じている。

今後の課題としては、電磁気学分野における「CASE 的なはたらきかけ」の実質化である。高校の力学で扱う内容は、日常生活の中で経験するものが多く、素朴概念を持っていることを意識させることは比較的容易である。一方で、電磁気学分野で扱う内容は、電場や電位といった、議論の起点となる概念すら日常経験で類似の概念が無いため、素朴概念も多様化しやすく、生徒間の議論を行うにしても発散する可能性が高い。いかに生徒に定義の重要性を納得させるかが鍵となると考えている。

４．謝辞

本研究は，JSPS 科研費基盤研究（C）研究課題「認知科学的アプローチにより問題解決能力を育む高校物理カリキュラムの開発」（15K00975）の助成を受けて行っている

参　考　文　献

[1] P. Adey, M. Shayer, C. Yates, “Thinking Science”, 2001.

[2] 谷口和成，他，日本物理学会講演概要集 64(1-2), 406(2009)，同 69(1-2), 457(2014)，等.

[3] 山下哲，谷口和成，” 高校物理における‘認知促進’プログラムと認知過程を重視した授業展開の可能性”，日本物理学会第 72 回年次大会講演概要集，20pC11-5(2017).

2017年日本物理教育学会 第34回 物理教育研究大会実行委員会

日本物理教育学会 会長 村田 隆紀

実行委員長	市田　正夫（甲南大学理工学部）
実行委員	安藤　武弘（兵庫県立姫路飾西高等学校）
〃	井俣由貴史（兵庫県立姫路商業高等学校）
〃	浮田　　裕（兵庫県立星陵高等学校）
〃	荻尾　彰一（大阪市立大学）
〃	岸　　一真（常翔啓光学園中学校・高等学校）
〃	神山　　保（滋賀大学教育学部）
〃	越桐　國雄（大阪教育大学教育学部）
〃	小無　啓司（流通科学大学）
〃	阪口　篤志（大阪大学理学部）
〃	種村　雅子（大阪教育大学教育学部）
〃	筒井　和幸（大阪教育大学附属高等学校池田校舎）
〃	中田　博保（大阪教育大学教育学部）
〃	糠野　順一（大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎）
〃	八木　秀浩（大阪府教育センター附属高等学校）
〃	山崎　敏昭（同志社中学校・高等学校）

日本物理教育学会
第34回 物理教育研究大会 講演予稿集

発行日　2017年8月11日
編集者　第34回 物理教育研究大会 実行委員長 市田 正夫
発行者　日本物理教育学会 近畿支部長　越桐 國雄
印刷所　株式会社 春日
〒542-0064 大阪市中央区上汐２丁目2-22 水谷ビル3F
電話 06-6767-0899