

## アドバンス物理を利用した理科の大学初年次講義II — 気体分子運動論をめぐって —

伊藤 克美・広瀬 敏行・畠山 森魚・篠島 大亮・塚崎 敬介

### 要 旨

学校教育課程理科の初年次生を対象にした講義スタディ・スキルズIにおいて、2003、2004年度に引き続き、アドバンス物理を利用した講義を行った。2005年度は、「熱」に関する章を選び、気体分子運動論とボルツマン因子の理解を目指した。アンケートなどから、理解の形成ができた事柄とともに、今後の課題が浮かび上がった。十分時間をかけて講義し実習を実施した、気体分子運動論、ボルツマン因子の由来、ブラウン運動などに関連した事柄の理解には一定の成果があった。一方、単位、力学の基本的概念についての理解が不安定である様子が見られた。今年度の経験をふまえ、来年度以降の講義の改善可能性について考察した。

### 1 はじめに

学校教育課程理科専攻の学生を対象とする入門科目スタディ・スキルズIでは、初年次教育として以下の様なことを目標としている。

1. 興味を喚起する、自分の頭で考える習慣を付ける。
2. 仲間と議論して（意見を出し合って）結論を出す。
3. 人に分かりやすいレポートを書く。
4. 聞く人に分かりやすい説明（の構成）を考える。
5. 話題は物理学から採り、内容の理解を目指す。

2003年から「アドバンス物理」を利用した講義を始めた。講義の内容・やり方については、学部紀要[1]に報告した。また、日本物理学会など[2]で口頭発表した。学会講演の際には、アドバンス物理を利用して全学の物理教育を行うことを検討しているので参考にしたい、とある大学の教員から質問を受けた。我々の報告は、大学での実践例として興味を持たれた様である。また、アドバンス物理は高校教員の間でも広く関心が持たれている。

本年度は、2003-2004年度と続けた、センサーを

中心に据えた講義から趣向を変えて、A2コース<sup>1</sup>から「熱」に関する章を選んで講義をした。新しい試みもいくつか実施したのでここに報告する。班に分かれて実習・実験を行う等、講義の基本姿勢は変えていない。講義のやり方などについては上記の学部紀要[1]を見て頂きたい。

今年度、「熱」をテーマを選んだ動機は以下の4つ。

- (1) 2005年は、「アインシュタインの奇跡の年」から百年ということで「国際物理年」とされた。アインシュタインの業績の一つであるブラウン運動に関連した話題を扱うのも良いのではないかと考えた。
- (2) ブラウン運動を見てみたい、出来れば自分でデータをとって「本当に酔歩しているのか」実測したい、という希望が我々の周辺で聞かれた。

ブラウン運動の理論をペランが実験的に検証し(1909)、原子の存在が確立した[3]。現在では電子顕微鏡を使って原子を「見る」ことさえできる[4]。一方で、「相対主義的科学論」<sup>2</sup>の影響を受け、原子

<sup>1</sup>アドバンス物理はASコースとA2コースから成り、前者が入門的。それぞれにテキストとCD-ROMが用意されている。

<sup>2</sup>この立場に立つ文献としては、例えば[5]、批判的な立場から書かれたものとして、例えば[6]。

の存在を否定する学校教員もいると聞く。従って

- (3) 原子論を扱いたい。  
 (4) 伊藤が2年次の学生に向けて開講している熱力学の講義にスムーズにつながる可能性がある。

以上、この講義の2002年以來の経緯を説明した。

最後に、本報告の構成を簡単に説明する。2~4節で実際に行った講義の内容を説明する。2節では講義の目標と内容の概略を述べる。次の3節では、扱った実習・実験について簡単に説明する。実際の講義がどの様に進行したのか、学生の反応なども含めて4節で記述する。講義前後で実施したアンケート、提出されたレポートなどから、学生から見た講義の評価+αがおぼろげながら読み取れる。これを5節で記述する。今回の講義についての我々自身の評価と来年度以降に向けての改善点などを次の6節で述べる。最後に、本報告のまとめを置く。

## 2 2005年度講義概要

講義前半では、気体分子運動論、後半はボルツマン因子とそれに関連する話題を扱った。

気体分子運動論を扱う内に、力学の知識が共有されていないことが分かったので、途中で力学の基本的な部分を理解してもらうために講義と実験を行い、もう一度気体分子運動論にもどって学習した。その他にブラウン運動を話題にし実際に観察した<sup>3</sup>。

次には、ボルツマン因子を理論的に理解することを目指し、最後に関連した実験を行った。水あめの粘性が温度によって変わる様子を計測して、「粘性がボルツマン因子に比例する」と仮定すると実験結果が説明できる事を確認した。

時間配分について振りかえってみたい。半期の講義は15回=22.5時間であり、13章に5回=7.5時間、14章に4回=6時間を使った。残りの時間の内、初回(=1.5時間)は、講義のやり方・内容の紹介、班分け、およびアンケートに使い、力学に5回=7.5時間を費やした。参考までに「Teaching Plan」<sup>4</sup>で見積もられている時間は、13章に12時間、14章に8時間となっている<sup>5</sup>。

<sup>3</sup>伊藤の注：今回初めてブラウン運動を自分の目で見た。講義とは別に、理科の他学年の学生および教員にも見てもらった。

<sup>4</sup>[7] Teaching Plan, Teacher's Guide, 13および14。

<sup>5</sup>我々は、アドバンス物理「Teaching Plan」に沿って講義を実施した訳ではない。

## 2.1 A2コース, 13章・14章の内容

テキストの各節のタイトルを表1に示した。十分な時間がなかったこともあり、満遍なく講義に採用した訳ではない。以下では我々が取り扱った箇所を中心に13・14章の内容を概観したい。

表1 13章および14章の構成

	極限状態の物質
13章	とても単純な物質
13.1	高く, 高く, 遠く
13.2	運動学的模型
13.3	物質の中のエネルギー
14章	とても熱い/冷たい物質
14.1	'魔法の比率' $\epsilon/kT$
14.2	ボルツマン因子 $\exp(-\epsilon/kT)$

内容に踏み込んで見よう。「高く, 高く, 遠く」というこれだけでは意味不明のタイトルを持つ13.1節では、気球の歴史とそれがどのような原理で機能するかを説明している。気球を話題にすることによって、気体の状態方程式、つまり、ボイル・シャルルの法則を説明してしまっているところが新鮮である。この話題からベルヌーイのアイデアの話になり、上記の気体分子運動論に話題を移している。

13.2節では、気体分子運動論の立場から理想気体の状態方程式を導くのだが、図による説明が充実している<sup>6</sup>。ここでは、気体分子運動論に基づいて、分子1個当たりの運動エネルギーが温度に比例する、という結果を導く。この結果は14章でボルツマン因子の議論をする際に生きてくる。この節の最後には、ブラウン運動の説明がなされている。

13.3節は、熱力学第1法則、仕事当量、比熱などを扱った上に、エネルギー等配則に言及している。

14章の最も重要な話題はボルツマン因子  $\exp(-\epsilon/kT)$  である。

14.1節では、物質は分子の集まりである、という観点から、非常な高温から非常な低温に至るまでの物質の存在形態の記述がなされる。記述は常に、 $\epsilon/kT$ の値に言及しながら行われる。

14.2節では、ボルツマン因子  $\exp(-\epsilon/kT)$  について以下の議論をしている。1) 粒子の集団の中で、

<sup>6</sup>図を読みこなすだけでも随分いろいろなことが理解される。後述の様に、このような作業も口頭発表の材料として利用した。

あるエネルギーを持った粒子の集合を考え、その中で、ある粒子が他の粒子に比べ余分なエネルギーを得る確率を考える。この議論からボルツマン因子  $\exp(-\epsilon/kT)$  を導くことができる。2) 一定の温度に保たれた大気の柱を考え、ボルツマン因子を具体的に導くこと。3) 活性化エネルギーを伴う反応でボルツマン因子がどんな意味を持つのか。

## 2.2 講義の目標

本講義では、気体分子運動論とボルツマン因子について理解することを目標に掲げ、それらに関わる話題も取り上げた。

13章の中心テーマは気体分子運動論である。ボイルの法則が発見されてまもなく、「ボイルの法則が気体の種類によらずに成り立つ」ということが明らかになった。これに対し、「気体=粒子の集まり」という気体の「模型」を考え説明を与えたのは、ダニエル・ベルヌーイ (1738) である<sup>7</sup>。気体を粒子の集まりと考えることによって、理想気体の方程式を導くことが出来る。粒子が小さいと想定する限り、どんな気体であるのかに依らずこの結果は正しく、上記の問いに答える。この意味で、気体の状態方程式は「普遍的」なものである。

上記のこと、つまり、気体分子運動論は、以下の一般的事柄を理解するのに格好の材料を提供している。我々の自然認識において『模型』は重要な役割を果たし、良い模型であればその予言力は大きい<sup>8</sup>。

この様な自然に対する理解は、実はかなり高度なものであり、納得するにはかなりの勉強が要求されるものであると考えられるが、ある程度でも伝えられればすばらしいことである。この観点は講義でも言及した。いつか思い出してくれることを期待する。

アドバンス物理13章の Aim<sup>9</sup>に、さらに具体的に次の様なことを理解して欲しいと書かれている。

1) 模型が、一連の現象をもう一組の現象に帰着させる様子(気体の振舞いを力学に従う粒子の運動に帰する)。2) 何が起きているのかを模型がどう説明し、どう新しい予言を生み出すのか(例えば、

分子の速度)。

14章のテーマはボルツマン因子である。ここは、熱力学から統計力学への橋渡しをする様な話題が集められている。この章を材料にして我々が目指したのは、物質を統計力学的に理解することのひな形を提供することである。そのために、1) ボルツマン因子がどのように生じるか、をパソコン実習も含めて理論的に理解すること、2) 気体柱の考察、3) 活性化エネルギーを伴う現象として粘性流体の振舞いの温度変化を実験的に観察すること、などを話題にしたいと考えた。特に、本講義で行った粘性流体に関する実験では、活性化エネルギーを伴う反応でのボルツマン因子の役割を深く理解してくれるものと期待した。

十分な時間がないだろうことはある程度分かっていたので、14章を全般的に扱うことは無理と判断していた。以下にアドバンス物理14章の目標(Aim)として記載されている事柄を手短かに紹介しておく。

広い温度の範囲での物質の存在形態と温度によるその変化を理解する。そして、絶対温度  $T$  により変わる内部エネルギーのオーダー  $kT$  と物質の活性化エネルギー  $\epsilon$  を比べることで、物質の結合が壊れるかどうかを判断できるようになること、およびボルツマン因子から、ある過程、ある温度で反応する粒子数の比を概算できるようになることを目指す。いわゆる「ソフトな物質」についてもある程度知って欲しいとある。最後に、物質が粒子で構成されているという事実が、我々の統計力学的理解が広い温度範囲に適用できることの真の理由である、と述べている。

## 2.3 講義の内容

### ～アドバンス物理をどう利用したか～

アドバンス物理のCD-ROMには様々な実習が収録されている。学生実験、パソコンを用いて行なうソフトウェア実習、家庭でできる実験、演示実験などである。

収録されている実習から以下のものを利用した<sup>10</sup>。13章では10E「空気の密度」、100S「箱の中の分子」、70P「ブラウン運動」。14章では150E「偶然だけによるレース」、170S「幸運を得る：偶然によりエネ

<sup>7</sup>気体分子運動論に関する歴史は、例えば、文献[8]の5章を参照。

<sup>8</sup>気体分子運動論がこの様に奥深いものであったこと、また、ベルヌーイの寄与・考え方を知って正直驚いた。高校物理でちょいちょいと理解して終わって仕舞う様な扱いでは勿体ない気がする。

<sup>9</sup>文献[7] Aims, Overview, Teacher's Guide, 13.14章も同様にある。

<sup>10</sup>文献 [7] Activity 10E, Resource Manager, 13; Activity 100S; Activity 70P; Activity 150E; Activity 170S; Activity 190S; Activity 280E。

ルギーの階段を昇る」, 190S「一つの粒子を追う：指数関数的ふるまい」, および280E「ねばねばした液体の流率」。10Eなどは実習に付された番号で, EはExperiments, SはSoftware Based, PはPresentationsを意味する。

時間の関係もあり, 力学に関してはアドバンシング物理を利用しなかった。本講義で扱った力学の内容は, アドバンシング物理ASコースの8, 9章, A2コースの11章に相当する。

### 3 実験：内容と目的

講義では, パソコンを用いた実習, 実験を行い, 4~5人の班ごとの発表をしてもらい, レポートの提出を求めた。以下では本講義で行った実験の概要を説明する。学生の様子もいくらか記述してある。

#### 3.1 空気の密度を求める実験 (cf. 10E)

元本学部理科の富坂幸治さん(現在国立天文台)の書かれた実験書「身近な物質に関する実験」[9]を利用して, 体積, 圧力および密度などの物理量の確認を意図した実験を行った<sup>11</sup>。内容は以下の通りである。

1) 体積の変化しない缶に空気を押しこめる。その前後で缶の重さをはかり, 押し込められた気体の質量を求める。

2) 押し込められた空気を水上置換法で集め体積を求める。質量と体積から密度を求める。

実験10Eでは電子はかりを用いているが, 本実験では上皿はかりを用いるので, 容器に空気をより押し込む必要がある。缶はカセットコンロの使用済みボンベに自転車の空気入れの口をはんだ付けしたものである。缶を用いる実験では断熱圧縮により, 気体が温められているのを感じることができる。本実験では, 密度を有効数字2桁で求めることを要求した。最小目盛りが1gのはかりを使い最小目盛りをさらに目測で読む。100mlで $0.0012 \times 100 = 0.1$ g, 1000mlで1.2g程度。従って, 有効数字2桁の密度を測るのに数千mlの空気を押し込む必要がある。実験時間は45分程度だった。

実験で求めた体積, 1気圧, および室温の測定から気体の状態方程式の成立を確かめてもらった。この課題で気体定数を間違えていた学生がいた。高校の化学と物理で, 単位の違う気体定数が使われてい

ることが原因としてあった。化学では $0.0821[\text{atm} \cdot \text{l}/(\text{mol K})]$ , 物理では $8.31[\text{J}/(\text{mol K})]$ である。我々は後者を用いている。J(ジュール)の単位がわからない, 単位の変換ができないなど, 単位でつまづく学生がいることがわかった。

#### 3.2 箱の中の分子, 気体分子運動論のシミュレーション (100S)

二次元の壁にかこまれた空間(箱)の中の分子の様子を再現している2つのシミュレーションの実習である。学生には気体分子運動論のイメージを共有してもらい意図で選んだ。実験書では「観察する」項目として以下をあげている。1) 箱の中の分子が前に後ろに動く様子。2) 多くの分子が衝突を繰り返して, 全体としてランダムな運動が作り出される。3) 分子間に広い空間があるときは, 箱の壁への衝突回数が分子の数に比例する。

一つ目のシミュレーションでは, 分子の個数を増やすと, ランダムな運動が生じる様子を見る。ただし, ランダムなのは方向のみで, 速度の大きさの分布までは考えない。次のシミュレーションでは, 分子の個数と壁への衝突回数が見られる。実験書では分子の個数を変えてみるように指示してある。そしてどのような条件で, ある時間に分子の壁に衝突回数が箱の中の分子の数に比例するか, と問いかけている。このシミュレーションでは分子の大きさが有限であるので, 個数が多すぎると理想気体の条件から外れ, 体積および温度が一定のとき分子の個数と圧力が比例するという関係が見られなくなる。

アドバンシング物理の13章の「Reason why」<sup>12</sup>には次のように書かれている。「気体分子運動論では, 一見矛盾している様に思える原則に出会う。分子はランダムに振舞い, 予想できない衝突をする。しかし, まさにそのランダムな振舞いが, 気体全体としては, 例えばボイルの法則で例示される様な, 滑らかで明確な振舞いを生み出している。」

#### 3.3 力学台車の速度を測定する実験

力学の基本的な概念を理解するための実験である。レールの上を走る台車の位置を測定し, 速度, 加速度を求める。速度, 加速度の定義, および運動方程式を確認することがねらい。また, グラフの見方, 書き方を習得することも期待した。ただし, 今回行ったやり方では誤差が大きいので, 加速度に関しては

<sup>11</sup>アドバンシング物理10E「空気の密度」に相当する実験。

<sup>12</sup>文献[7] Reason why, Overview, Teacher's Guide, 13.

精度の良い結果は得られなかった。これを補うため、センサーを用いた演示実験も行い、精度の良い材料を提供した。

位置を測定するのに携帯電話に付属するカメラの連続写真機能を用いた<sup>13</sup>。撮影は1秒間隔に選んだ(0.5秒程度の間隔では誤差が大きい)。等速直線運動の実験では、減速するのも測定点が少ないのも困るので、2 mのレールを4秒程度で移動する速度にする様に指示した。加速度の実験では台車にミニ扇風機を乗せて走らせた[11]。

表2およびグラフ(図1および図2)は等速直線運動の実験例である。有効数字や誤差については、正しく記せていない学生が多くみられた。この傾向は今年だけではない。大学におけるはじめての実験において、単位(次元)や誤差については教えることが必要だと考える。

表2 連続写真から求めた位置, 速さ

距離 × 5 cm	速さ × 5 cm/sec
1 ± 0.5	9 ± 1
10 ± 0.5	
20 ± 0.5	10 ± 1
29 ± 0.5	9 ± 1

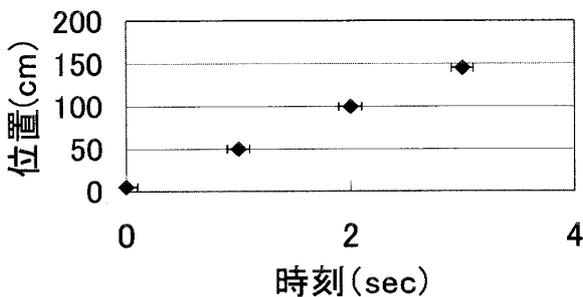


図1 時刻-位置のグラフ

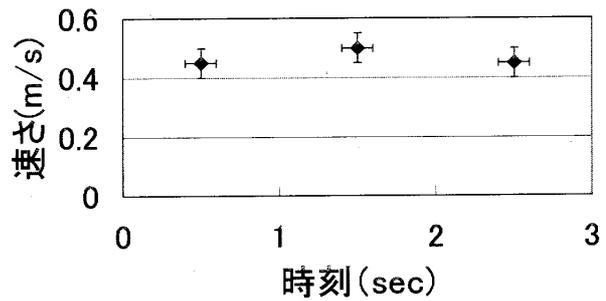


図2 時刻-速度のグラフ

### 3.4 ブラウン運動の観察 (70P)

煙を例にブラウン運動の様子を観察した。気体分子の運動の証拠として実際に観察できる。

「よせなべ物理実験集」[12], およびアドバンス物理を参考に実験した。煙は線香の煙である。「よせなべ物理実験集」に従い、1 cm × 1 cmほどの、煙を入れる小さな容器を作成した。容器の下にはアクリル板を入れることで穴をふさいだ。

二台の顕微鏡を用いて学生に交代で観察してもらった。30分程度で学生全員が観察できた。線香の煙を箱の中に集め、顕微鏡の焦点を合わす準備には手間取った。

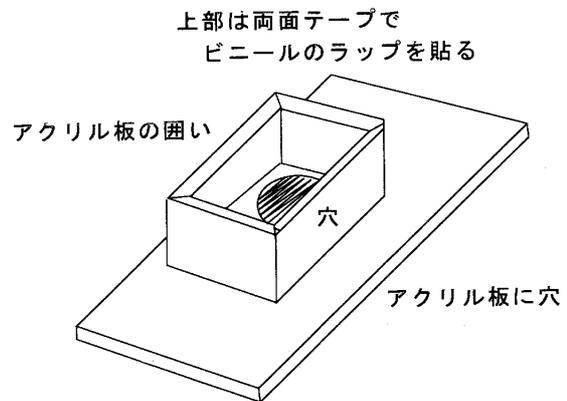


図3 煙を入れる容器の模式図

### 3.5 仕事と運動エネルギーの実験

エネルギーの定義を確認し、運動エネルギーが速度の大きさ $v$ の2乗に比例することをみる実験。質量 $m$ の台車に一定の力 $F$ で $x$ の距離の間、仕事 $W$ をする。 $Fx = mv^2/2$ が仮定される状況にあるとき、 $F$ および $m$ が一定として $x$ が $v^2$ に比例することをみる。 $F, m$ の数値を与え、定量的に確かめること

<sup>13</sup>測定に携帯電話を用いるという工夫は広瀬の考案したものであり、2005年度PCカンファレンス[10]で報告した。

もできる。実験装置を図4に示した。ここでは、「一定の力」は落下する重りの作り出す張力である。

この実験では以下の事柄に注意する必要がある。力が働かなくなった直後、摩擦によって台車が減速をする前の速度を求める必要がある。また、レールを水平にする必要がある。これらの点について、学生は注意していない様子だった。プリントには理論計算と比較をするために必要な値  $F$ ,  $m$  を載せていたが、考察には使われていなかった。また、張力とおもりに働く重力との関係が理解できず、とまどっていた班があった。

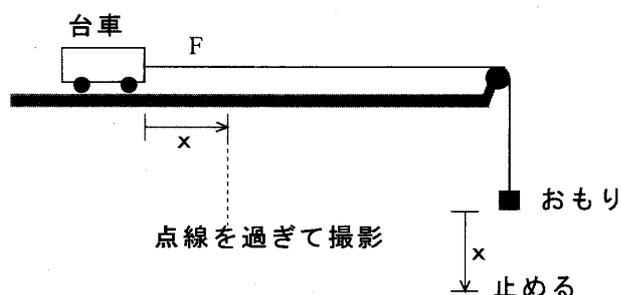


図4 実験装置の模式図

### 3.6 運動エネルギーと位置エネルギーの実験

運動エネルギーと位置エネルギーの関係をみる実験。具体的には次の様なことを行う。斜面から水平になめらかに変わるレールの上を、高さをかえて小球を転がす。水平になった後、写真を連続して撮り、速度を求める。横軸に高さ、縦軸に速度の大きさの2乗のグラフを書く。この実験の高さは重心の高さの差のことであり、細かく注意する必要がある。

ただし、運動エネルギーは並進の運動エネルギーと回転の運動エネルギーを考慮することになる。位置エネルギーは質量  $m$ 、重力加速度  $g$ 、高さ  $h$  とするとき  $mgh$ 、運動エネルギーは並進の運動エネルギーが、速度の大きさ  $v$  のとき  $mv^2/2$ 、および回転の運動エネルギーは慣性モーメント  $I$ 、角速度の大きさ  $\omega$  とするとき  $1/2 I \omega^2$  である。回転エネルギーは物体が転がる球体の場合  $C > 1/5$  となる定数で  $Cmv^2$  と表すことができる。  $C = 1/5$  のときは底の点で転がる時である。

$$mgh = mv^2/2 + Cmv^2 = (1/2 + C) mv^2.$$

$h$  が変わるのに比例して  $v^2$  が変わるのをみる。

### 3.7 確率的にエネルギーを得る分子の実験・実習 (150E, 170S, 190S)

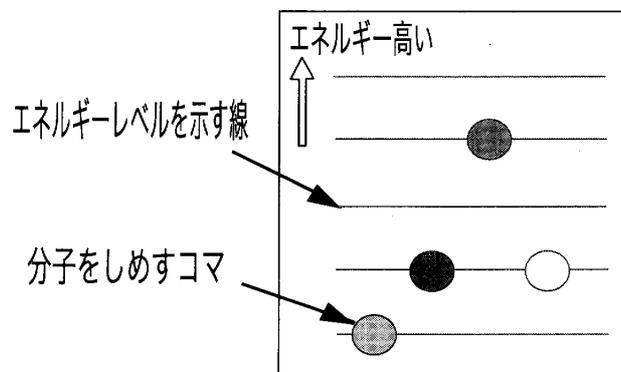


図5 実習の用紙

3つ実習を行った。1つは実験で150E「偶然だけによるレース」、2つはシミュレーションで170S「幸運を得る」および190S「一つの粒子を追う」である。実験では横線を等間隔の高さに描いた用紙とコマを用意する(図5参照)。サイコロを振り、特定の目のときに、線を昇り、残りの目のときに下がるようにする。線がエネルギーのレベルに相当し、コマが分子に相当する。確率による分子の振舞いをみる。アドバンシング物理の実験書に従い、5, 6が出たら昇ることにした。1つ上のレベルに行くのは1/3の確率、2つ上のレベルに行くのは  $1/3 \times 1/3$  の確率である。

シミュレーションではサイコロを振る代わりに、自動生成される乱数をもとに分子を表す印が上下する。170Sでは、分子の集まりのある瞬間的なエネルギー分布をみることが出来る。

190Sでは、一つの分子について、ある時間内に各エネルギーレベルに存在していた頻度を自動で表示する。

### 3.8 ねばねばした液体の流率の実験 (280E)

ねばねばした液体を透明の容器に入れひっくり返す。液体の半分がたまるのに要した時間を  $t$  とする。この  $t$  が(絶対)温度  $T$  によりどのように変わるかを調べる。実験活性化エネルギー  $\epsilon$ 、ボルツマン定数  $k$  とするとき、  $1/t$  が  $\exp(-\epsilon/kT)$  に比例する。このことは、粘性率(粘度)の理論では、Eyringの式として知られている[13]。実験では  $\ln(1/t) = -\epsilon/kT + C$  のグラフを書き、傾きから活性化エネ

ルギー  $\epsilon$  を求める。ねばねばした液体としては原材料とうもろこし澱粉の水あめを用いた。水槽に50℃、40℃、30℃、20℃および10℃の水を用意し、そこに容器をいれた後、容器をひっくり返し時間を測定した。トータルで90分以上時間がかかった。

図6は学生の実験結果である。横軸には絶対温度逆数、縦軸には時間の逆数の自然対数をとっている。学生の実験ではきれいに直線にならなかった<sup>14</sup>。実験結果からは、活性化エネルギーの大きさは  $5.4 \sim 6.8 \times 10^{-20} \text{J} = 3.4 \sim 4.2 \times 10^{-1} \text{eV} = 33 \sim 41 \text{kJ/mol}$  だった。「水素結合は  $20 \text{kJ/mol}$  程度のものが多いが、 $8 \sim 100 \text{kJ/mol}$  のものがある」[14]。水あめの原材料は澱粉である。澱粉とは「 $\alpha$ -D-グルコースを構成単位とする多糖類。アミロースとアミロペクチンの2種成分からなり、その量的割合は起源により異なる。」[14]。グルコースはブドウ糖とも呼ば

れるが、OH、Hを持つので水素結合が澱粉中にあると考えられる。

関連して、果糖（フルクトース）とブドウ糖（グルコース）との二糖類であるショ糖の温度による粘性の変化をグラフに示す（図7）。横軸に絶対温度の逆数、縦軸に粘性率の対数をとっている。0℃から95℃まで水に対する20、40、および60Wt%（重量パーセント）のショ糖がプロットされているが、直線状になっているのがわかる。グラフは流体の熱物性値集[15]の表から作成した。14章のReason why<sup>15</sup>には「熱力学の性質は物理、化学および生物に同程度に重要である。ある特定の分野のみに使われる熱力学の例に制限することは損害がある。しかし教師は慣れた範囲から離れたがらない。」とある。熱力学の特性から、この実験も物理化学と呼ばれる分野に少し踏み込んでいるようである。

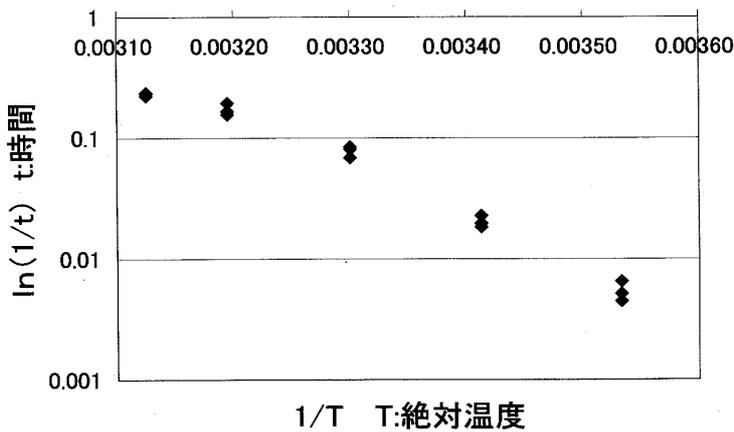


図6 学生の実験結果

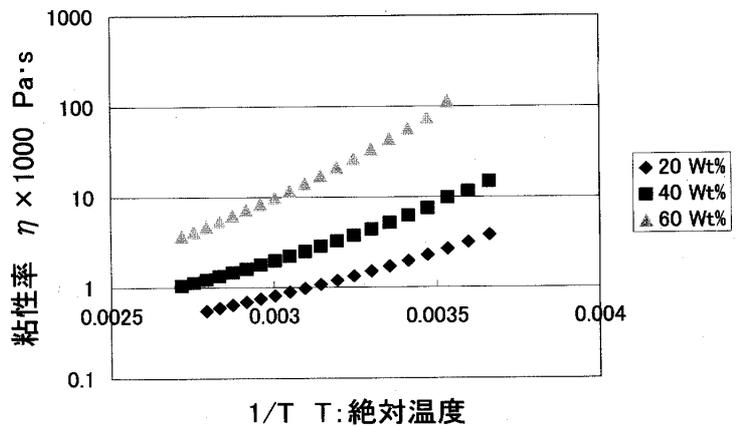


図7 ショ糖・砂糖の粘性係数

<sup>14</sup>後で行った検証実験から、熱伝導がよくなかったことがわかった。室温の状態の容器に入った水あめを50℃の水槽にいれ5分たっても40℃程度だった。

<sup>15</sup>文献[7] Reason why, Overview, Teacher's Guide, 14.

#### 4 講義の記録から

表3に実際に行った実習・実験の内容を日程表として示した。何も記載のない日にはテキストについて講義のみ行った。

図8は講義の流れを示したものである。時間軸を上から下にとってある。また、通常の講義などの説明的な内容は左側、実習・実験・口頭発表などの学生にとって体験的な内容は右側に書かれている。関連のある項目は矢印でつないだ。

半年間の講義の間、講義に直接関与した畠山、広瀬、伊藤の3人はそれぞれ気付いたことを記録している。今回の講義は様々な意味で新しい側面がある。それに対する学生の反応を含めて、我々のとった記録から一部をここに記載しておきたい。

第1回(4/12) 学生19人の自己紹介、班分け、4～5人。講義の内容を紹介。アドバンス物理A2の13章と14章を扱うことを伝え、参考として13章、14章のcheckupの訳を配布してこれから学ぶ事を伝達。講義前のアンケートを実施。アンケート

表3 2005年度の日程表

月日	実習・実験・口頭発表
4/12	
4/19	身近な物質に関する実験
4/26	
5/10	学生発表:「気体の運動学的模型」解説
5/17	学生発表:「気体の運動学的模型」解説 パソコン実習:箱の中の分子(100S)
5/24	実験:運動の解析 (携帯電話の連続写真機能を利用) DVDリメディアル物理(力と運動)
5/31	
6/7	ブラウン運動の観察(70Pに相当)
6/14	実験:仕事と運動エネルギー 実験:位置エネルギーと運動エネルギー
6/21	学生発表
6/28	学生発表
7/5	
7/12	3種類のパソコン実習: 偶然だけに頼るレース(150E) 幸運を得る(170S) 一つの粒子を追う(190S)
7/19	実験:ねばねばした液体の流率(280E)
7/26	学生発表

の最後に講義に関して以下の注意事項を配布。1) 自分の頭と手足を使って理解に努めること。2) 高校で習った「公式」に頼らないこと。3) 高校でやらなかったことを毛嫌いせずにチャレンジすること。4) 人と話合ってお互いの理解を助け合うこと。分からないことは分からない、と言うこと。5) 理由のない欠席はしないこと。

第2回(4/19) 13-1について資料を配布、解説。ポイントがいくつか。・Breitling Orbiterという気球の運行には、ボイル、シャルルの法則の両方が関わる。・ボイルの法則を説明するためのベルヌーイの「模型」(気体分子運動論の原型)の重要性。

講義後半は「身近な物質に関する実験」[9]を実施。3.1 空気の密度を求める実験(10E)参照。空気の重さを測り、理想気体の法則が成り立っているか検討。この実験について書かれたレポートから課題が浮かび上がった。単位が理解されていない、実験内容の理解に難あり。

リメディアル物理を紹介[16]。

第3回(4/26) この日の講義内容は3項目。

1) 前回のレポートに見られた問題点について解説: 単位, 次元, 実験での計測結果の妥当性など。2) 理想気体の状態方程式をグラフに描く。一変数を固定してグラフを描いてもらった後, 例えば圧力が二変数の関数としてグラフに描けることを説明<sup>16)</sup>。3) A2コース, 13.2の解説(cf. 2.1節)。

第4回(5/10) アドバンス物理のテキストには図が数多く掲載されている。いずれも良く配慮された説明が付されており, 図を読み解くことでかなりのことが理解できる。これは, とても教育的な作業であると考え<sup>17)</sup>。この日, テキスト92頁にある「気体の運動学的模型」に関する一連の図を全体に説明してもらうことを1班の課題にしてあったので口頭発表をしてもらった。図には, 記号・数式が書き込まれており, 定義をしっかりとしないと理解が危うい。1班には定義を明示するように求めた<sup>18)</sup>。

<sup>16)</sup>これは今後, 学生が出会う多変数関数への布石として紹介したつもり。

<sup>17)</sup>本年度の講義を超えて伊藤の全般的な経験からすると, 学生たちはこの様な作業をあまり丁寧にやらない。こう言ったことの重要性を経験する機会がなかったのだろうか。

<sup>18)</sup>今回の講義でも数回学生たちに準備してきてもらって説明してもらったが, うまく出来ない。内容の理解も問題なのだろうが, 聞いている人たちと情報を共有する(例えば, 記号の約束の説明)ことに意識が向かないことがよく起こる。

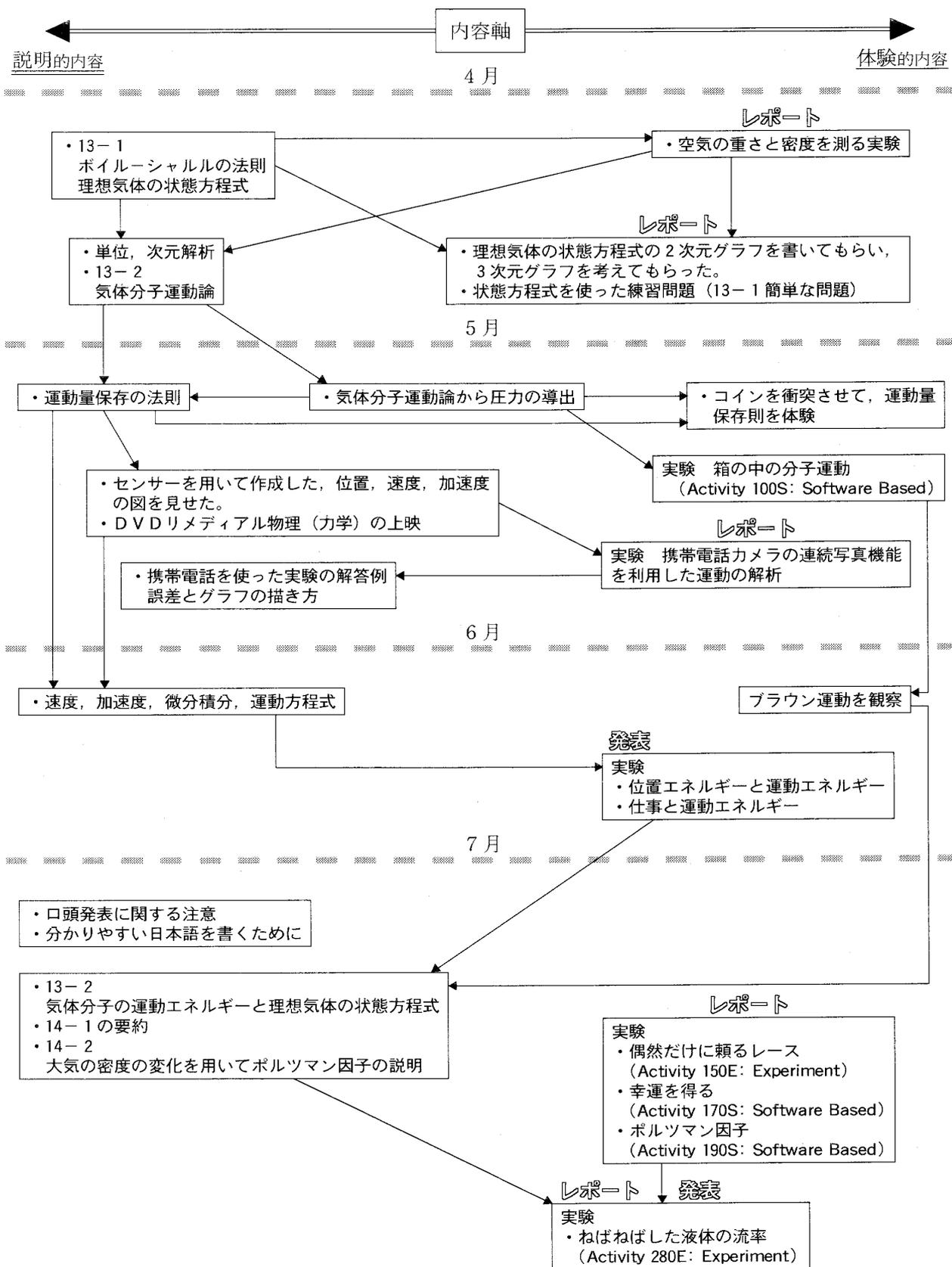


図 8 2005年度の講義の流れ：横に内容軸，時間は上から下へ

「言葉が難しい」という学生があり、いくつか答えた。前回の「単位」の話を広瀬が再度解説。

問題点がいくつか。1) 発表の中で運動量と力の概念に混乱があった<sup>19</sup>。2) 質問を促したがなかなか出ない。扱った内容が高度であったのも効いているだろうが。初回の発表の内容は簡単な話題にした方が良く、という教訓か。昨年度の講義では最初に発表した班がとて良く準備していたためもあり質問がよく出た。さらにその後の様々な口頭発表も割合うまく行った。

第5回(5/17) 前の週に続き、一班の発表。力、運動量などの力学の基本的概念が理解されておらず、議論が深まらない。

感想を班ごとにメールで送ってもらった。以下、その中から抜粋。発表することの難しさ、質問する事の重要性を理解した。発表する人、質問する人、それぞれ理解が深まって良かった。高校のときは十分理解できなかった、次元と運動量が分かった。運動量・力積等の概念が理解できない(予備知識に差がある)。

力学が消化されていない様子なので、広瀬、畠山、伊藤で相談して、次回から数回、力学の基本的なところを議論することにした。

パソコン実習。3.2 箱の中の分子、気体分子運動論のシミュレーション(100S)参照。

第6回(5/24) 実験：等速直線運動・等加速度運動(広瀬のアイデアで携帯電話を利用)。3.3 力学台車の速度を測定する実験を参照。リメディアル物理のDVD(力学)を見ながら解説。各種センサーとパソコンを用いて、実験結果をその場で解析する様子を見る事ができる。例えば、作用・反作用の法則がグラフで直接確認する様子が描かれている。

第7回(5/31) 「速度・加速度、微分積分、運動方程式」について資料を配布して解説。前回の実験に関連づけて解説をした。

第8回(6/7) 「速度・加速度、微分積分、運動方程式」について質問を募り解説。テキストのブラウン運動のところを解説し、実際に見てもらった。3.4 ブラウン運動の観察(70P)参照。

第9回(6/14) 力学的エネルギーの保存則を理解する事を目標に実験を2つ(広瀬作成の実験に

関する資料配布)。3.5 仕事と運動エネルギーの実験、3.6 運動エネルギーと位置エネルギーの実験参照。

第10回(6/21) 実験「仕事と運動エネルギー」について3班の発表。3班に、実験レポートを班でひとつ提出してもらった。

このレポートについて我々は問題を感じた。以下、いくらか問題点を挙げる。1) 内容以前に、日本語や論理がおかしい部分が散見された。2) 客観的な事柄、主観的な事が分離されずに文章が書かれている。読む人の立場になって書かれていない。

第11回(6/28) 実験「位置エネルギーと運動エネルギー」について2班の発表。5人のメンバーの内、1人の学生がとて頑張った、という印象を残した。発表の仕方について気になったのは、理論と実験結果が混在されて説明されたこと(この班に限らず、口頭発表・レポートとも、分かり易い説明の仕方について考慮が足りない。今年度の特徴だった)。

実験で球を転がしたときに、回転運動のことも考慮に入れないといけない。そのことの説明。簡単に慣性モーメントについて説明した。

第12回(7/5) 資料を二つ配布：「口頭発表に関する注意」「分かりやすい日本語を書くために」

本題は、第14章ボルツマン因子。テキストにある図について解説。大気(温度一定の気体中の分子分布)を話題にしてボルツマン因子を導く。温度と反応の起こり易さ、活性化エネルギー、などについて解説。A2のテキストでは、これらすべてについてグラフ、図が丁寧に準備されている。

第13回(7/12) 前回に続き、ボルツマン因子について講義の後、実験及びパソコン実習「偶然だけに頼るレース」「幸運を得る」「一つの粒子を追う」。3.7 確率的にエネルギーを得る分子の実験参照。以下の問いについて、答えをメールで提出してもらった。1) テキストに書かれた内容(大気の密度変化)とこの日の実習の関係、あるいは、実習で確認した事は何か。2)  $\exp(-mgh/kT)$  とパソコンで見た物との関係について考察すること。

第14回(7/19) 「ねばねばした液体の流率」の実験。3.8 ねばねばした液体の流率の実験参照。

第15回(7/26) 「ねばねばした液体の流率」の実験について4班による口頭発表。各班にレポート提出を求めた。講義後のアンケートを実施。

<sup>19</sup>この班には、物理が得意である、とする学生がいたのだが。やったはずの事柄についての理解の危うさは他にも散見された。例えば、微積分、エネルギーと運動量、それらの保存について。この学年に特有のことではないが。

## 5 アンケートおよび理解度チェック

講義に関して感想，意見およびアンケートを書いてもらった。20人ほどの学生だったが，講義への反応は実に様々である。学生から出された感想・意見を簡単に紹介した後（5.1節），講義前後に行ったアンケートの結果を報告する（5.2節）。また，講義で扱った具体的な項目について，理解の程度を確認した。結果を5.3節に記す。

### 5.1 レポートなどに書かれた感想・意見から

実験レポートなどに書かれた学生の感想・意見の中から，要点のみいくつか紹介する。

一般的な意見としては「物理で使う言葉に慣れていない。説明を入れて欲しい。」「なるべくたくさんの実験をしたい。」

次元解析・単位について説明したときに「単位をそろえなければいけないということはわかったがどの単位にそろえたらよいのか？」「単位を書いて，数字の意味の明らかになることがあらためてわかった。」「なかなか興味深かった。特に次元の話は役に立ちそう。」

気体の状態方程式（2変数関数のグラフ）は，一部の学生に評価された。「気体の状態方程式を立体のグラフで考えたことがなかった。分かり易かった。」  
等速度運動・加速度運動の実験：この実験はうまくやれた様子。特に演示実験については「高校で似た実験をやったが，パソコンで精密なグラフが見れてよかった。理想的なグラフだったので驚いた。」これは明らかなIT利用の評価。

リメディアルフィジックス：「現象をムービーで見て良くわかってきた。」

運動エネルギーと位置エネルギー：「実験に誤差はつき物だが予想を大幅に外した」この感想は複数あった。実験のやり方の改善が必要。

### 5.2 学生アンケートから

アンケート対象者は講義を受けた19人。アンケートは初回の講義と講義終了後に行った。ただし，全員がすべての質問に答えてくれたわけではないので，個別の質問に対して回答総数は多少揺れている。また，同内容の設問ながら，講義前と講義後で選択肢が少し違っているものもある。

#### (1) 講義前：理科について（図9参照）

後述の結果から次の様な様子が読み取れる。1）

小・中・高を通じて理科が好きだが，小・中ではやさしい理科が，高校で難しくなる。理科を得意とする学生の方が多いが，物理は7割の学生が選択しながら苦手とする人数が多い。2）教職に就きたいと考える学生がほとんどである。3）以下詳細は記していないが，数学の習得状況も調べた。大半の学生がべき関数の微分・積分，ベクトル，三角関数については習得した，としている。

以下，個々の質問について記載する。

(1a) 「理科は好きでしたか」：小学校のとき，好き（4名），やや好き（14名），ややきらい（1名），きらい（0名）。中学校のとき，好き（8名），やや好き（11名），ややきらい（0名），きらい（0名）。高校のとき，好き（5名），やや好き（13名），ややきらい（1名），きらい（0名）。

(1b) 「理科の授業はやさしかったですか」：小学校

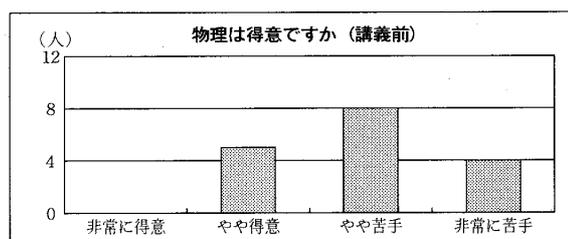
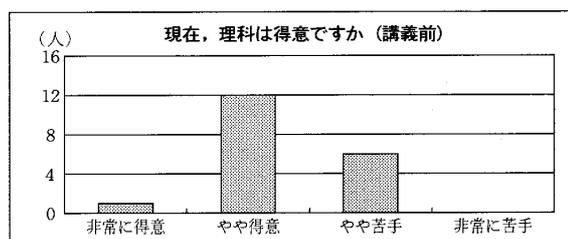
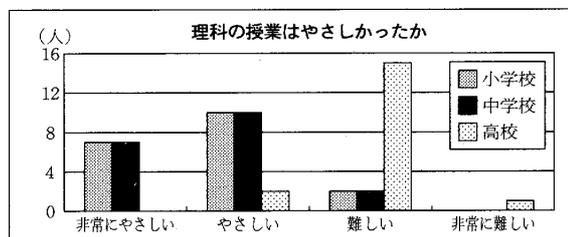
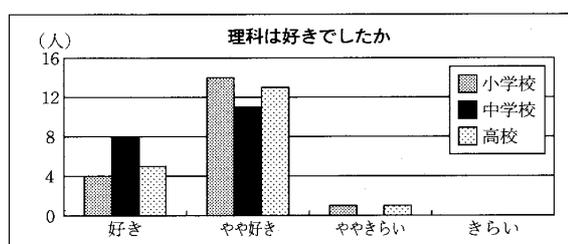


図9 講義前：理科についてのアンケート

のとき、非常にやさしい(7名)、やさしい(10名)、難しい(2名)、非常に難しい(0名)。中学校のとき、非常にやさしい(7名)、やさしい(10名)、難しい(2名)、非常に難しい(0名)。高校のとき、非常にやさしい(0名)、やさしい(2名)、難しい(15名)、非常に難しい(1名)。

(1c)「現在、理科は得意ですか」:非常に得意(1名)、やや得意(12名)、やや苦手(6名)、非常に苦手(0名)。

(1d)「物理は得意ですか」:非常に得意(0名)、やや得意(5名)、やや苦手(8名)、非常に苦手(4名)。

(1e)「教職に就きたいと思いますか」(グラフなし):はい(15名)、いいえ(1名)、未定2名。

(1f)「高校で物理を選択していましたか」(グラフなし):はい(13名)、いいえ(6名)。

(1g)「理科についてどんなところが好き、または、嫌いでしたか」(記述回答):

- ・理科の授業では、先生の話を書いたり、問題を解いたり、班で話し合いをしたり、実験ができたこと、いろいろなことができたので楽しかったです。
- ・高校1年生のときは、化学が理解できなくて、非常に苦労しました。しかし今は理科の中で化学が最も好きです。
- ・自然現象を解き明かせるところが好き。
- ・物理では、今まで不思議に思っていたことが証明され、新しい知識が得られるところ。
- ・公式の数が多く、憶えられなかったので、問題をほとんど解くことが出来なかったから。
- ・自分の力で問題を解けるようにならないところ。

## (2) 講義後:講義に関連して(図10参照)

講義後アンケートの傾向を述べる。講義前から物理は難しいと思っていた中間層の一部が、講義を受けることでやはりそうだったかと確認したのではなにか、という印象を残す結果である。

1)物理は難しいという印象が講義前からあったそうだが、この印象は講義では解消できなかった様だ。講義は難しく、物理が苦手とする学生が少し増えた。2)「物理が得意」とする人より「数学が得意」とする人の方が多いことがみてとれる<sup>20</sup>。3)

科学を理解するのに数学は必要であるとする。また、教職に就きたいと考えている学生が大半で講義前のアンケートと同じ人数である。自由記述から物理は難しいという印象が講義前からあったことが読み取れる。講義後も難しいと感じる学生もいた。講義前より難しいと感じるようになった学生もいた。

(2h)~(2k)の自由記述から学生の様子が読み取れるだろう。

(2a)「講義の内容はどうでしたか」:難しい(16名)、適当である(2名)、やさしい(0名)。

(2b)「配布した文章を読んできましたか」:読んだ(3名)、目を通した(15名)、読まなかった(0名)。

(2c)「「読んだ」または「目を通した」人へ:内容をどうお読みしましたか」:面白い(7名)、特にない(11名)、つまらない(0名)。

(2d)「物理は得意ですか」:非常に得意(0名)、やや得意(2名)、どちらでもない(4名)、やや苦手(6名)、全く苦手(7名)。

(2e)「数学は得意ですか」:非常に得意(1名)、やや得意(7名)、どちらでもない(6名)、やや苦手(5名)、全く苦手(0名)。

(2f)「科学を理解するにあたり、数学は」:非常に必要(11名)、必要(8名)、なくてもよい(0名)、いらぬ(0名)。

(2g)「教職に就きたいと思いますか」(グラフなし):はい(15名)、いいえ(2名)、未定が1名だった(選択肢として用意はしていない)。

(2h)「扱われた話題・教材についてはどう思いましたか」(記述回答):

- ・分子の運動についてや、物質の運動エネルギーについてなどの身近にかかわってくるようなものの話題や教材、実験だったので、それについて知ることができてよかったと思う。
- ・英語ばかりでよく分からないところもあったが面白いと思った。話題としては良かったと思う。
- ・ボルツマン因子の話は難しかった。気体の話はよかった。
- ・わりと身近なものに感じられた。
- ・あまり身近でないのでピンとこなかった。

(2i)「物理に対してどのような印象を持っていましたか」:

- ・数式が多くて難しいイメージ。
- ・難しいとは聞いていたが、物理をやってみたくて思っていた。
- ・数式が多く、微分・積分などの数学の知識も必要。

<sup>20</sup>伊藤の教員としての経験からすると、このアンケート結果が事実、つまり、学生の数学と理科の実力を反映しているとは思えない。

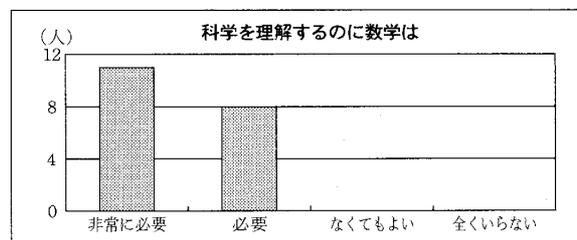
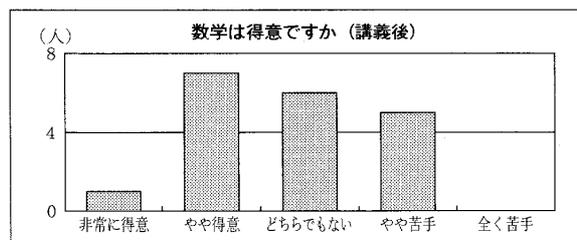
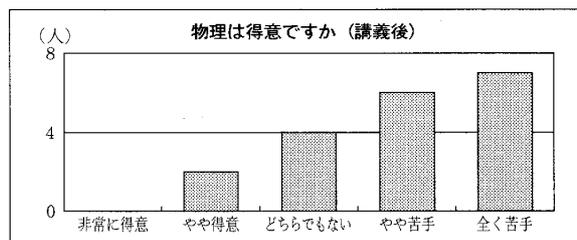
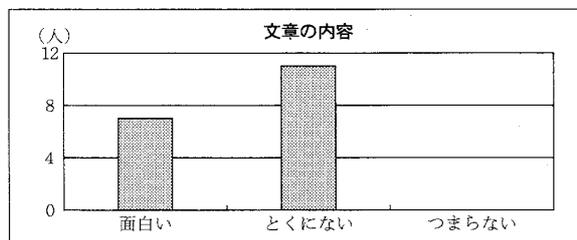
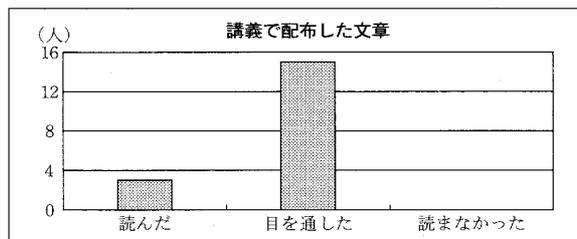
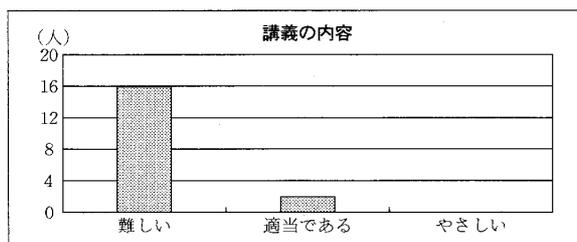


図10 講義についてのアンケート

- 数式を使う。あまり自分とは相性よくなさそう。
- ただ公式を理解・暗記し、応用していくもの。
- 「公式の暗記」「実験をせずに計算で理論だけ

を追う学問」だと、また、ただ公式を丸覚えして利用していくものだと思っていました。

(2j) 「この講義を受けて物理に対する印象はどうなりましたか。」:

- 自分が思っている以上に奥深くて、かつ数学の力が重要であるということが分かった。
- 印象は変わらないが意識は変わった。この講義ではあらかじめ数式が与えられた上での取り組み<sup>21</sup>だったが、実験などの帰納法的な事は楽しいと思うようになった。

など肯定的な意見があった。

- あいかわらずむずかしい。
- 思っていたよりもむずかしく、まだ習ってない所がたくさんあった。

など、やはり難しいという意見が8名から。

- 前もっていた(数式が多く難しい)イメージがより強くなった。
- 今まで以上に嫌いになった。
- 嫌悪している。

という意見もあった。

(2k) 「今後、物理を勉強してみたいですか。」:

- もっと勉強したいと思っています。
- 実験を通して学習していくのなら勉強したいと思った。

など意欲の感じられる回答が6名から。

- 他の科目に比べて特に理解することが難しいので、しなくていいのであればしたくない。
- あまり勉強したいとは思わない。

したくないと答えた学生が4名いた。また、他に

- 教養程度に。
- してみたいと思う。いきなり難しいものは無理なので、身近で簡単そうな物事から取り組んでみたいと思う。
- 興味はあるが実力的に理論についていくのは難しいと感じた。それよりも他の分野に興味があるので、専門にしていくつもりはありません。

などの回答があった。

### (3) 班を単位に活動に関して

(3a) 「話し合いをすることについて」(講義前、図11参照): 得意(1名)、やや得意(5名)、やや苦手(10名)、苦手(0名)。好き(7名)、やや好き(8名)、ややきらい(3名)、きらい(0名)。

(3b) 「班でコミュニケーションはとれましたか」

<sup>21</sup> どうしてこういう印象を持ったのか不明。

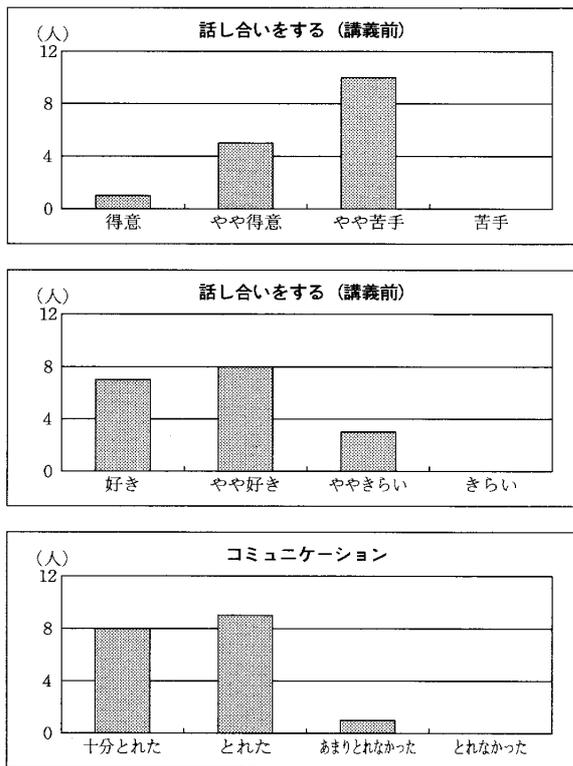


図11 班についてのアンケート

(講義後)：十分とれた (8名)、とれた (9名)、あまりとれなかった (1名)、とれなかった (0名)。

(3c) 「話し合って理解を深めることについて、高校までの授業で機会がありましたか。それはどんなときですか。何について話し合いましたか。それで自分の理解は深まりましたか。」(講義前)：

- ・実験結果を提出するのに、友人と協力して仕上げた。分からないことを聞くと、教えてくれたので、自分のためになった。
- ・小学校の時、学活の時間を利用して、担任の提案でディベートをやりました。理解が深まったというよりも、それぞれの考えを勧める意見がたくさんあることがわかった。

など何らかの機会を答えたのは16名中7名で4割である。また「ありません」「覚えていない」など答えたのは9名で6割だった。

(3d) 「今回の講義で、話し合いをして学んだと思うこと・感想・気になった点」：

- ・他の人が自分と異なった視点で考えている場合があり、それを自分のものと比較することができるので、考え方が広がったと思う。
- ・わからないところを聞くのは大切。発表の時、発表している人の質問があるかどうかという問

いかけの間隔が短すぎて逆にわかりにくい。

- ・物理を理解している人は、内容を理解できていたが、理解できない人は、理解するまでにかなり時間がかかるので、1時間や2時間で理解するのは難しいと思った。

話し合いをすることについて、やや苦手で、好きな学生が多かった。班でコミュニケーションがとれた学生が大半だった。高校までの授業で話し合う機会を答えた学生は回答中4割である。記述式より、話し合いをすることを有意義に思っている学生がいた。

#### (4) 文章・報告文を書くことについて

以下の回答から読み取れること<sup>22)</sup>。1) 説明文・報告文を書くことは、やや苦手、ややきらいな学生が多い。2) 高校までに説明文・報告文を書いたことのある学生は回答中4割。3) 説明文・報告書の書き方を学んだことがある学生は非常に少ない。

(4a) 「説明するための文章、または報告文を書くことについて」(講義前、図12参照)：得意 (1名)、やや得意 (1名)、やや苦手 (12名)、苦手 (3名)。好き (2名)、やや好き (4名)、ややきらい (9名)、きらい (2名)。

(4b) 「高校までの授業において、何かを説明するため文章、または報告文を書く機会がありましたか(感想文、日常の作文は除く)。それはどんな文章でしたか。」：

- ・物理・化学の実験レポート。

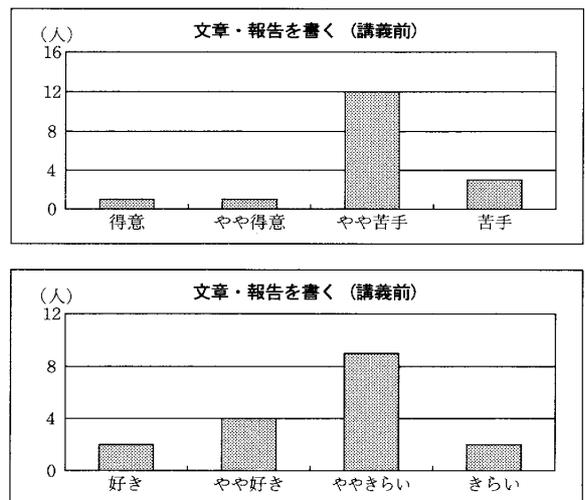


図12 文章を書くことについてのアンケート

<sup>22)</sup>最後の点は日本の教育の弱点であると、伊藤は考えている。

- ・中学校の総合的な活動で発表しました。
- ・小論文（環境破壊について）など。

など何かしらあると答えた学生は18人中8人。残りは「ありません」、「覚えていない」など。

(4c)「報告書・説明文の書き方を学んだこと、教えてもらったことがありますか。学んだ人はどのようなことを学びましたか、説明してください。」「書き方は学ばなかった。」「ありません」など答えた学生が13人（回答15人）だった。他に次の記述があった。

- ・すべて実験結果をありのままに客観的にかく。
- ・全体的な流れや文の組み立て、言葉使いなど。

### (5) 口頭発表について

(5a)「人前で発表することについて」（講義前、図13参照）：得意（1名）、やや得意（3名）、やや苦手（11名）、苦手（2名）。好き（3名）、やや好き（4名）、ややきらい（9名）、きらい（1名）。

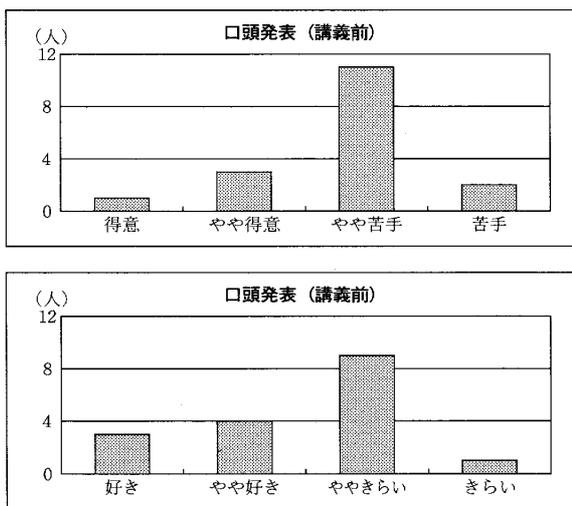


図13 口頭発表についてのアンケート

(5b)「高校までの授業において、何かを説明するために口頭発表する機会がありましたか。それはどんなときでしたか。」:

- ・中学校の総合的な活動や理科の授業で。
- ・小学校の時に歴史上の人物で自分が興味を持っている人について調べたことをクラスのみんなに説明する口頭発表みたいなことはやりました。
- ・長岡高校理数科出身なので、SSHの課題研究があり、研究結果を発表するという機会がありました。など何らかの機会を答えた学生は17人中9人だった。また「そういう授業はなかった」

「なし」など答えた学生は8人だった。

(5c)「今回の講義において、自分で発表することで学んだことがありますか。」:

- ・発表するとなると、いっそう考える時間もふえるので、理解が深まり、非常によかった。
- ・自分では理解しているつもりでも、相手に論理的に説明することは難しいと感じた。
- ・事前の準備が大切。

などの回答があった。

人前で発表することはやや苦手やややきらいな学生が多かった。

### (6) 実験・実習について

(6a)「実験・実習は」（講義前）（図14参照）：得意（0名）、やや得意（12名）、やや苦手（3名）、苦手（0名）。好き（10名）、やや好き（8名）、ややきらい（0名）、きらい（0名）。

(6b)「実験・実習は」（講義後）：得意（2名）、やや得意（4名）、どちらでもない（8名）、やや苦手（3名）、苦手（1名）。好き（6名）、やや好き（10名）、どちらでもない（1名）、ややきらい（0名）、きらい（0名）。

(6c)「高校までの授業において物理の実験・実習をする機会がありましたか。それはどんな機会でしたか。どんな実験・実習でしたか。」:

- ・授業でありました。落下運動、運動量保存、メートルブリッジ等。
- ・落下運動について 波の実験。
- ・共鳴の実験。水位をかえながら、音さと共鳴する高さを調べる実験。

などがあった。17人中11人の学生が何らかの実験をしていた。

(6d)「今回の講義において実習・実験は難しかったですか、それとも簡単でしたか。難しかったもの・簡単すぎたものを教えてください。」:

- ・流率の実験は難しかった。
- ・方法はどれも簡単だと思ったが、その目的などを理解するのはどれも難度が在ったと思う。
- ・実験は難しくなかったが、学べなかった。

流率の実験が難しいなどと述べたものは5名いた。

(6e)「実験をした感想・学んだと思うこと・気になった点を書いて下さい。」:

- ・単位について考えるようになった。
- ・実験は好きなので、実験を通した授業で非常によかった。
- ・自分が物理が苦手なので、発表のときに、どの

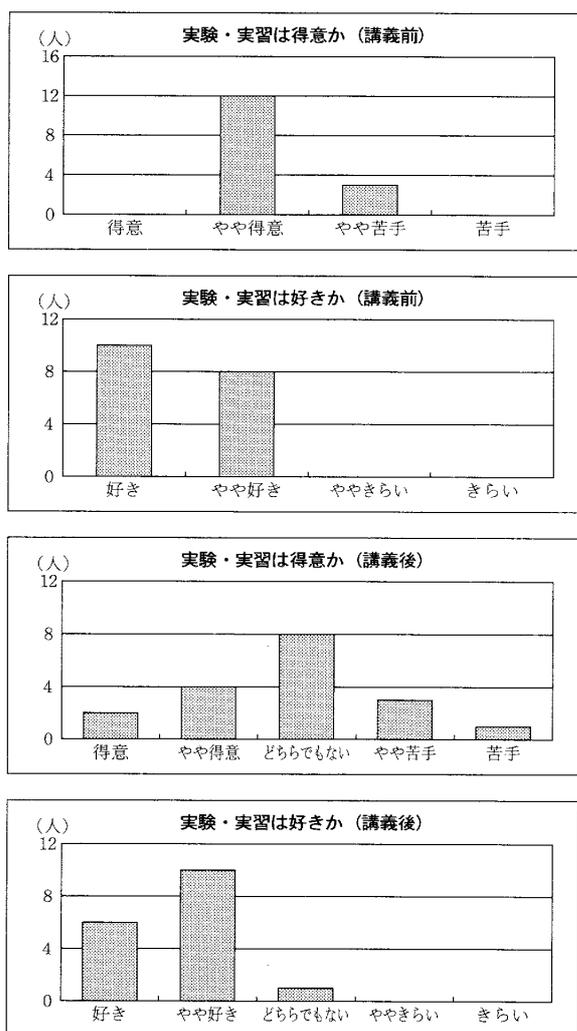


図14 実験・実習についてのアンケート

ようにすれば、伝わりやすいか非常に考えた。

- ・知識が不十分な状態で行ったため、今何をしているかわからなくなる時があった。
- ・ほとんどの実験が目分量だったので、データがあいまいになり、「だいたいこんな感じ」と流す場面があったので、ある程度、しっかりとデータを得られるような実験にしたい。
- ・学んだことは、実験結果から、高校物理で使用した式を導き出したこと。また、それまでの過程。

講義前、実験・実習は「やや得意」で、「好き」または「やや好き」な学生が多かった。選択肢で「どちらでもない」が増えた講義後、得意かどうかの質問では、「どちらでもない」学生が多く、「やや得意」を選んだ学生は減った。好きかどうかの質問では、「好き」を選んだ学生は減り、「やや好き」が

増えた。どちらでもないを選んだ学生がいた。回答中6割の学生が高校までで物理の実験・実習をする機会を持っていた。

### (7) 単位・次元について

(7a) 「単位の計算についてどれほど知っていましたか。単位について理解が深まりましたか。」:

- ・SI単位というものは知らなかったが、講義で説明された内容で「なるほど」と思った。
- ・いままでは単位はあまり考えずに計算していた。
- ・今回の講義で少し次元に関することを理解できた。

(7b) 「(次元解析の)次元について知っていましたか。」:

- ・知識としてはあった。
- ・簡単なものは知っていた。

など16人中7人が知っていた。一方、知らなかったあまり知らなかったなど9人が知らなかった。

### 5.3 どの程度理解してもらえたか: CD-ROMの理解度チェックリストを利用して

講義内容の理解の程度を確認するために、幾種類かの質問に答えてもらった。1) 13章, 14章の内容についての具体的な質問, 2) 使われている用語の理解度, 3) グラフ, 次元, 式に関する質問。

以下、この順に結果を含めて記述する。

#### 1) 13章, 14章の内容についての具体的な質問

CD-ROMには各章ごとに理解度を量るチェックリスト<sup>23</sup>が収められている。このリストを参考に、講義内容の理解の程度を確認した。回答は、「(今回の)講義で理解した, 前から知っていた, 分らない」から選ばせた。

大雑把に見て、「前から知っていた」という答えは13章の内容に関する質問に対して多く、内容が高度になる14章に関する質問については少ない。当然だろう。

13-1: 「気体の法則から絶対零度という概念が生まれた。」

13-2: 「気体の法則はつぎの1つの法則にまとめて表される:  $pV = nRT$ 」

13-3: 「気体を、動き回る弾性粒子の集まりという模型で考えることができる。」

13-4: 「運動学的な模型は理想気体には当てはまる

<sup>23</sup>[7] Student's checklist

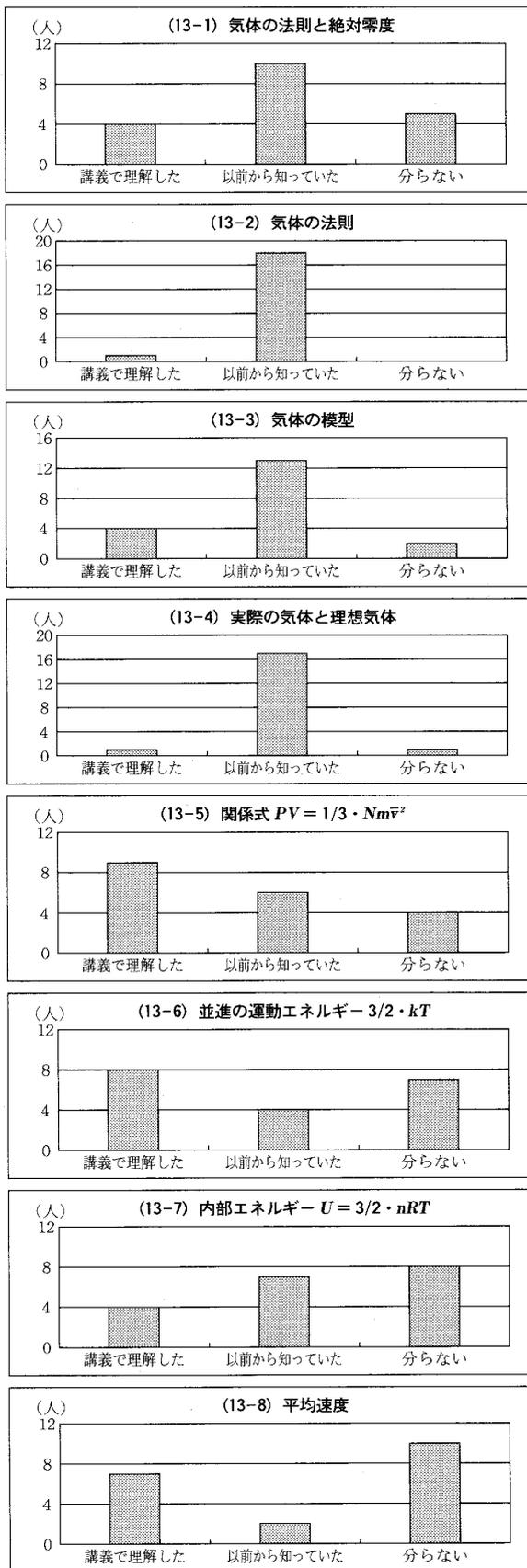


図15 13章チェックリスト (I)

が、実際の気体は低温度と高圧で理想的な振る舞いから外れる。」

13-5:「運動学的な模型からはつぎの関係式が導かれる:  $pV = 1/3 \cdot Nm\bar{v}^2$ 」

13-6:「気体中の粒子が平均時に持つ並進に伴う運動エネルギーは  $3/2 \cdot kT$  である。つまり絶対温度に比例する。」

13-7:「単原子分子から成る理想気体の内部エネルギーは  $U = 3/2 \cdot nRT$  である。」

13-8:「気体分子の持つ平均的な速度 (The root mean square speed of a gas molecule) は  $1/2 \cdot mv^2 = 3/2 \cdot kT$  を用いて計算できる。」

13-9:「真空への広がり方, 拡散, ブラウン運動は, 気体の運動学的な模型の証拠になる。」

13-10:「気体中の一つの分子は, 他の分子とのたぐさんの衝突の結果としてランダムな動きをする。」

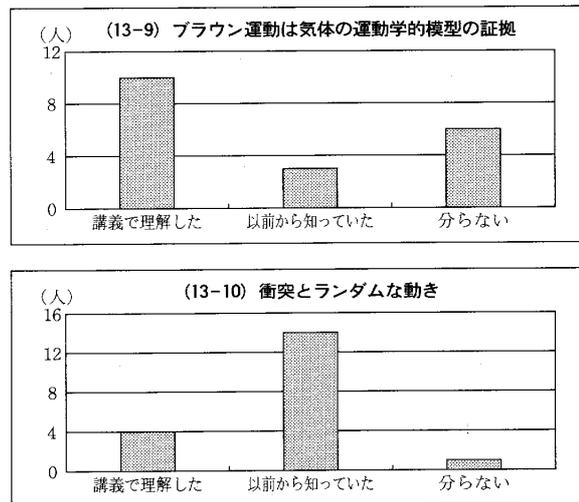


図16 13章チェックリスト (2)

14-1:「結合は, それを壊すために必要なエネルギー  $\epsilon$  で特徴付けられる。」

14-2:「高温では, 結合は壊れ, 物質はばらばらになる。原子はイオンと電子に分かれてしまう。高温では,  $\epsilon$  が大きくても,  $\epsilon/kT$  は小さくなる。」

14-3:「低温では, 熱的な活動が小さく,  $\epsilon$  が小さい限り  $\epsilon/kT$  は大きい。物質は固体や液体となり, 複雑な構造が生じる。」

14-4:「エネルギーが  $\epsilon$  だけ違っている二つの量子状態にいる粒子数の比はボルツマン因子  $\exp(-\epsilon/kT)$  そのものである。」

14-5:「周辺の多くの粒子から, ランダムに, 繰り返しエネルギーをもらう状態になるにつれ, 確率が

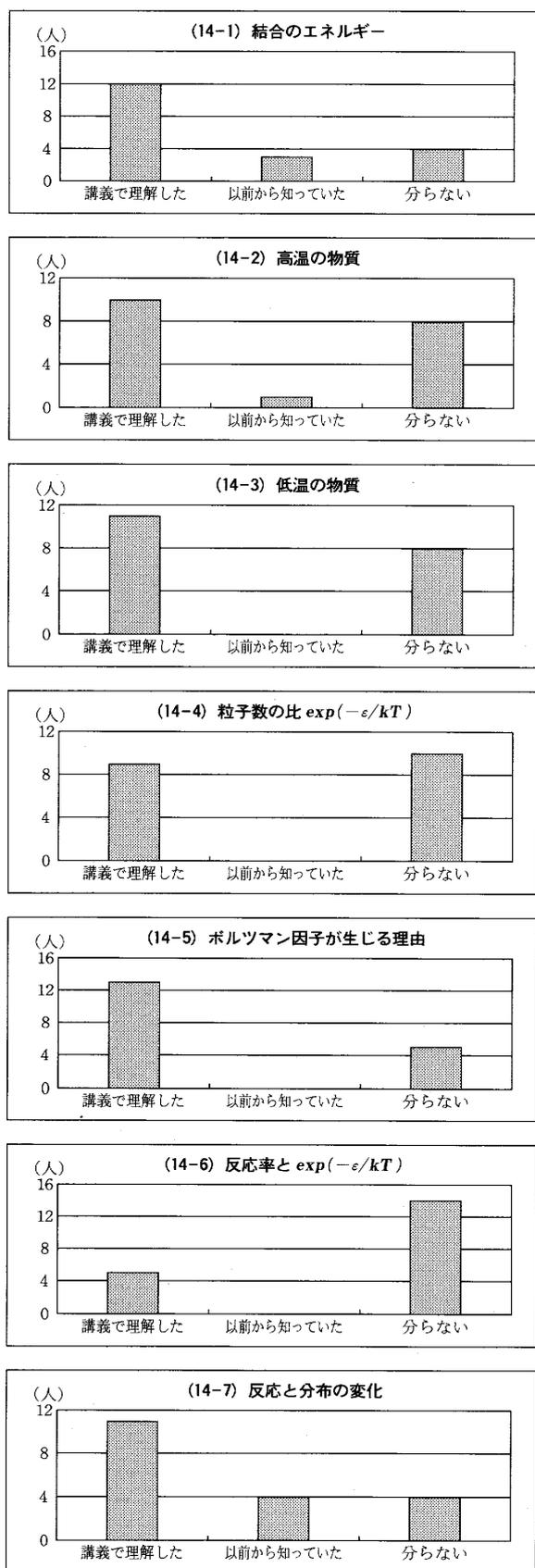


図17 14章チェックリスト

小さくなるのが、ボルツマン因子が生じる理由である。」

14-6:「ある反応が起こるために  $\epsilon$  だけのエネルギーが必要であったとする。この反応の反応率は、第一的な近似では  $\exp(-\epsilon/kT)$  に比例し、 $\epsilon \gg kT$  である場合には温度とともに急速に増える。多くの変化は  $\epsilon/kT$  が15から30程度になると明確に測定できる程度に起こる。」分らないとい回答した割合が高い。

14-7:「反応には、エネルギーとともに、粒子の空間分布・粒子の向きの分布の変化などが伴うことがある。」

## 2) 講義で使われた用語の理解度

次の表を見て頂きたい。今回扱った話題に関連して使われた用語に関して、「以下の言葉を正しく使えますか」という質問をした結果である<sup>24</sup>。表の左側の数字は関連するアドバンス物理の章の番号を書いてある。

表4 用語の理解度

章	次の言葉を正しく使える?	○ (名)	× (名)
13	理想気体	8	2
13	絶対温度	8	1
14	ボルツマン因子	0	10
14	活性化エネルギー	5	7
8	速度	9	1
8	加速度	8	2
11	運動量	1	10
9	運動エネルギー	4	6
9	位置エネルギー	7	2

前半の4項目は熱に関連し、後半5項目は力学に関連している。熱に関して、最初の2つの言葉が使えて、残り2つ、特に数学的にも概念的になるボルツマン因子が使えないとするのは、分かり易い。活性化エネルギーについては図を用いて様々な例を講義で紹介した。力学について、「正しく使える」順序が、速度、加速度、位置エネルギー、運動エネルギーとなるのも自然かも知れない。ただし、**運動量**についてこれほどガタンと使いにくくなるのか。この認識は持ち合わせていなかった。

<sup>24</sup>アドバンス物理のチェックリストを利用して作成。

### 3) グラフ, 次元, 物理量を表わす式に関する質問 (表はない)

グラフに関する質問をした。

描ける割合が高かったのは： $PV = nRT$ で、 $n$ ,  $T$ が一定のときの $P$ - $V$ グラフ、 $PV = nRT$ で $n$ ,  $V$ が一定のときの $P$ と $T$ , 等加速度運動での時刻-加速度, 等加速度運動での時刻-速度。

描ける人, 描けない人が混じていたのは： $P = \rho R/MT$ において、 $T$ が一定のときの $\rho$ と $P$ のグラフ、 $T$ が一定のとき $h$ の関数としてのボルツマン因子 $\exp(-mgh/kT)$ ,  $\epsilon$ が一定のとき $1/T$ の関数としてのボルツマン因子 $\exp(-\epsilon/kT)$ 。指数関数はやはり苦手だろうか。「ねばねばした液体の流率」の実験結果を表わすグラフには指数関数を使ったのだが<sup>25</sup>。

質量×速度, 質量×加速度, 運動量, 力, 位置エネルギー,  $kT$  ( $k$ はボルツマン因子,  $T$ は絶対温度), 運動エネルギーを, 次元ごとにグループ分けする問題では, 正解できたのは回答者13人中8人だった。

物理量を式で書く問題では, 仕事= $Fx$ , 運動量= $mv$ が回答者17名が全員できていた。しかし運動エネルギーについては回答者15名中, 正解は12名で運動量と同じ式を書いたものが2名, その他が1名いた。運動量については, 式は書けても自分では使えない, という事か。

## 6 今年度の講義をどう評価するか: 今後に向けての改善点など

ここでは講義を実施した我々自身の, 今年度の講義の評価などを書き残しておきたい。来年度以降に向けての改善を検討する。

### ● 全般的な問題

内容を盛り込み過ぎた。特に後半(14章周辺)扱った事柄にかけた時間が足りなかった。今後, 精選する必要がある。実験に関しても, 新しいスタイルでやったのは良いが, まだ, 十分な精度で結果を出せる状態に仕上がっていないものがあつた。これは今後改善する必要がある。

### ● 班の構成と学生の主体的活動について

問題というより工夫を必要とすることとして, 実習・実験の班の構成について気付いたことがある。

4, 5人という人数は分からないことを議論するには適切に見えるが, 実習・実験には, 多過ぎて一部の人たちだけに頼る傾向が見えた。例年この傾向はあつたのだが, 今回内容が多少高度になつたために顕著になつてしまつたのかも知れない。実習・実験の内容によって班をさらに割るなどした方が良いのではないかと考えている。

### ● 「有機的」理解を獲得してもらうために

学生の, 物理の理解における弱点として見えることとして, 実習・実験でやっていることと理論的事柄(知識, 理解とか, 計算によって得られるもの)があまり有機的に結びついて理解されていないことがある。この様な相互関係についてほとんどの学生があまり関心を払っている様にも見えない。この辺をどうするかは大きな課題だろう。実験と理論を交互に行うような講義は他にはあまりない。講義のスタイルのために良く見えてきた問題なのかも知れない。

理論 → 予想 → 実験・解析 → もう一度理論へ, という様なサイクルを経験させる工夫が良いのではないか。実験で何を知りたいのか, 目的意識を持っていないまま実験を始めてしまう様に見えることもあるが, 予想する段階を入れる工夫がこちらの側で必要かも知れない。

### ● レポートの書き方・内容について

前述のことと関係するが, 実験と理論と公式それぞれの役割が良く消化されていないレポートの書きぶりが気になつた。エネルギー保存を確認する実験レポートで4割の損失があつても「保存する」と書いてあつた。エネルギーは保存するという知識と実際の実験が矛盾したら考え込まなくてははいけない<sup>26</sup>。また, 主観的な事柄と客観的な事柄が分離されていない文章構成もあつた。

レポートの書き方が思わしくなかつたことについて, 論理的な文章に触れる機会が少ないことが原因の一つではないかと考えている。高校までに論理的な文章を書く機会をもつていた学生もいたが多くはない, 書き方を学んだことがある学生は少なかつた(cf. 5.2, (4)文章・報告文を書くことについて)。

また, 新しい話題の取り扱いに力を注いで, レポート・口頭発表についての指導が足りなかつたことも原因と考えられる。これは我々の方の反省材料である。レポート・口頭発表の仕方についてどういふこ

<sup>25</sup>3.8 ねばねばした液体の流率の実験では, 縦軸に1/時間の自然対数をとつたためか, 縦軸について自然対数をとつた回答があつた。

<sup>26</sup>精度良い結果の出る実験を考えるのは, 今後に向けて我々の責任である。

とを配慮すべきか、資料は作成してあるので、初回に配布すべきだった。ただし、学生の様子を見てみると、自分の意見を外に表わすことはひどく苦手としている。例えば、誰かのレポートを全体の見ている前で手直しして見せるなど、非常に具体的な指導をする必要があるのではないかと考えている。

#### ●口頭発表について

口頭発表では、自分たちで行ったことを他の班の人たちに簡潔にわかりやすく説明することを目標としてもらった。聞いている側も分からなくなったら質問するように促した。

昨年と比べると、今年度の口頭発表はあまりうまくなかった。昨年の発表は、1) 初回の話題が割合簡単なものであったこと、2) 最初に発表したグループが結構うまくやれたこと、などの理由で口頭発表のイメージが良く浸透した様子だった。今年は初回で扱った話題が既に難しいものであったのかな、と考えている。今後の検討課題である。

#### ●力学を理解させることの重要性の認識

運動量、力積等の概念が分からなかったと感想を書いた学生が5人ほどいた。また、力と運動量の区別ができないままの口頭発表もあった。運動量と運動エネルギーの混乱もあった。

運動量が我々が想像した以上に学生には理解しにくい概念であるようである。エネルギーを理解できなかった学生も結構いるのではないか。高校で物理を選択していた学生も十分に理解できていないかもしれない。物理に自信を持っているという学生が、物理は公式の応用、と思っていることも知った。力学の基礎的な部分を学ぶのが、彼らにとって重要であると理解した。

今回行った力学の実験で、精度の悪かった部分もあるものの、自分の手で速度のグラフを書く事ができたことは皆にとって大きかったのではないかと観察された。

#### ●その他、学生を見ていて気付いたことなど

単位系を選んで計算すべき、SI単位系を使いましょう、というメッセージは送ったつもりである。混乱が生じた例として気体定数  $R$  があった。高校では、物理と化学で使う単位が違うことがある、と学生に指摘された (cf. 3.1節・実験 (10E), 4節・第2回)。

次元を扱うことが難しいのは理解できる。次元について説明した際に少数ながら楽しんだ学生がいたのは良かった。

積分が理解できていないのは、高校までで十分に

積分の概念 (おそらく積分を極限によって定義することが消化できていない) に関する問題を考えていないためと思われる。

#### ●その他に

最後に、本年度、ブラウン運動を見せることができたのは成果だと思う。その他に、昨年までと比較して学生が実習・実験に費やす時間が十分確保できたことも良かったと考えている。

## 7 まとめ

2005年度のスタディ・スキルズIでは、アドバンス物理の、主に13, 14章を利用し、気体分子運動論やボルツマン因子などの内容を扱った。対象とした学生は学校教育課程理科教育専攻1年生19名である。

本稿第1節に述べた様に、我々が講義の目標として掲げていたのは次の5点である。

1. 興味を喚起する、自分の頭で考える習慣を付ける。
2. 仲間と議論して (意見を出し合って) 結論を出す。
3. 人に分かりやすいレポートを書く。
4. 聞く人に分かりやすい説明 (の構成) を考える。
5. 話題は物理学から採り、内容の理解を目指す。

以上のうち、4までについては、2003年度 [1] と比べて、我々が考察すべき事柄にそれほど大きな変化はない。最初の目標のためには、話題が多少高度であったかとも考える。口頭発表とレポートに関して指導する時期が遅れて、本年度は十分なことができなかった。

物理の内容をどの程度消化できたかに関しては前節で分析した通りである。昨年度までに比べ、話題は高度になり、豊富でもあった。このために難しいと感じた学生が出た様である。ただし、時間をかけて説明・実習などを行った箇所は理解されている傾向があるので、来年度以降はもう少し扱う内容を削って精選したものにすべきではないかと考える。力学から始めて気体分子運動論までを扱う程度で十分なのではないか、さらに言えば、エネルギー・運動量の定義とその保存について、実験・理論両側からの理解が形成されれば十分な成果ではないか、と考える。力学に関する実験の精度が出せなかった。精度の上がる様な実験が工夫できればより深い理解に至る可能性があるだろう。

気体分子運動論についてより深い理解に基づいて講義ができたこと、ブラウン運動を観察させることができたこと、力学実験を手作りの装置で実施したことなど、一定の成果があった。水あめを用いた実験から、活性化エネルギーがそれなりの値に求まった。これが妥当な値であるのか、行った実験が適当なものであったのか、(アドバンシング物理には記述されていないが)粘性率の理論式の導出など、我々には気になることが残った。もちろん、これらの考察は今回の講義の範囲を超えて卒論などにふさわしいものかと思う。

最後に、本年度の1年生に講義をして気付いたこともあり、直接には講義に関係しないが、伊藤の感想を述べさせて頂きたい<sup>27</sup>。

今年10月に現在30代半ばになっている卒業生たちと会う機会があった。教員になっている彼らから、自分たちの受けた様な厳しい講義をするべきである、と意見された。確かに私の行っている講義のレベルも後退に後退を重ね、彼らの時代には考えられないレベルになってしまっている。

2000年度入学生から、新教員免許法が適用され教科専門の必要単位数が減った。その明らかな影響で学生はますます勉強をしなくなった。以前から学生は「役に立つことを教えて欲しい」と口にするのが良くあった。もちろん「役に立つ」とは、何の役に立つのか、ということ議論しないと意味のない問題設定だ。それぞれの学生の言う「役に立つ」は人によって違うだろう。10年ほど前、この言葉を発した学生に答えを用意しようと半年ほど考え込んだことがあった。半年経って話したら、面白くなってきたからもう「役に立つ」の質問はいつでも良い、と言われた。学問の面白さに気づいたら良い、という訳だ。こういう変化が10年前には可能だった。その後、学生の間でこういう変化を起こす時期が少しずつ遅くなり「役に立つ」との格闘は続いた。次第に学生が勉強しなくなるに従って「教員採用試験さえ通れば良い」ということをよく聞く様になっていた<sup>28</sup>。こういう傾向があったところに、教科専門の科目を以前よりとらなくてよくなった。

多くの学生は、3、4年生になっても講義のときだけ話を聞き、試験のときだけ勉強する、というこ

としかしなくなつた<sup>29</sup>。短期記憶だけに頼って理解できるほど物理は甘くない。以前から、教員になるのだから採用試験さえ通れば良いのでしょ、大学の勉強なんてどうでも良いでしょ、という意見が通奏低音の様に学生の中に蔓延しており、新入生は先輩のその様な言葉にさらされながら学生生活を送っている様に見受けられる。今年、驚愕したことは、講義の最後にとったアンケートに同じ趣旨のことが書かれていたことだ。新入生からこんなことを書かれるとは思ってもよらず、驚いてしまった。後で尋ねたら、そんなことは裏では結構言っている、のだそうだ。上記の教員になっている卒業生たちは新任教師との付き合いに苦慮すると言う。大学ではもっときちんとした教育を受けさせるべきだ。それが我々の社会的な責任だろう。この問題は、制度をいじる事ではなく、地道な作業を要求していると思う。

### 謝辞

講義の流れをチャートにして見渡す、というアイデアは坂田洋史さんによるものです。小林昭三さんには「リメディアル☆フィジックス」を紹介して頂き、講義に役立てることが出来ました。また、「相対主義的科学論」についての文献も教えて頂きました。Advancing Physics 研究会・京都和歌山のMLを通じて、笠潤平さん、高橋哲郎さんから海外の教育現場での原子論の取り扱いについて教えて頂きました。皆さんに感謝します。

### 参考文献

- [1] 広瀬敏行, 伊藤克美, Advancing Physics を利用した理科の初年度講義, 新潟大学教育人間科学部紀要, 第6巻第2号 自然科学編 (2004) pp.93-106.
- [2] 広瀬敏行, 伊藤克美, アドバンシング物理を利用した理科の初年度講義, 2004年度日本物理学会年会; 日本物理教育学会新潟支部講演会, (05.1.29, 新潟高校にて); 第11回新潟大学全学FD報告 (04.9.17).
- [3] ジャン・ペラン, 玉虫文一訳, 『原子』, 岩波文庫, (1978).
- [4] 例えば, 第46回科学技術映像祭入賞作品 アトムファクトリー, NHK 教育テレビ, 05.4.30放送.
- [5] 角屋重樹・松浦拓也, 新しい科学論に立つ科学教育課程のあり方, 科学教育研究, 25 (2001)

<sup>27</sup>この部分の文責は伊藤にあります。

<sup>28</sup>教員の採用数が減ったことも大きく影響していると思う。

<sup>29</sup>一方で、物理科では大学院に進学する学生が毎年出る様な状況もある。2極分化。

- pp.356-362.
- [6] 田辺勝義, 相対主義的科学論と理科の「教育改革」, 日本の科学者 36 (2001) pp.268-272; また, 中央教育審議会に提出された (04.12.22 付け) 提言, 「初等中等教育に関する提言」(日本物理学会・応用物理学会・日本物理教育学会の学会長の連名) も参考のこと。
- [7] 「Advancing Physics A2 2001」CD-ROM, Institute of Physics Publishing, (2001).
- [8] キース・J・レイドラー, 寺嶋英志訳『エネルギーの発見』, 青土社, (2004).
- [9] この実験は富坂氏が準備されたもの。以下参照。  
[http://th.nao.ac.jp/~tomisaka/Lecture\\_Notes/Physics\\_Lab/reaction.html](http://th.nao.ac.jp/~tomisaka/Lecture_Notes/Physics_Lab/reaction.html)
- [10] 五十嵐尤二, 廣瀬敏行: コンピュータを用いた基礎物理実験, 2005PC カンファランス, CIEC, pp.163-164.
- [11] 小林昭三, 笠原健, 村田章知, 力と運動の素朴概念を転換するIT活用法の有効性, 教育実践総合研究, 2003-2号, pp.39-62; 小林昭三, 五十嵐尤二, 福原晴夫, 森田龍義, 伊藤克美, 廣瀬敏行: IT活用法による理科教育の革新とネットワーク化, 修士課程における教科専門と教科教育との内容的な連携協力の在り方・第2年次(平成14年度)研究報告書, 新潟大学教育人間科学部・教科専門と教科教育との内容的な連携協力構想研究会, 2003年3月, pp.123-136.
- [12] 編集: 埼玉県高等学校理化研究会 物理研究委員会 実験班, 転載&インターネット版作成 北村俊樹, 「よせなべ物理実験集」, 以下参照  
<http://www.bekkoame.ne.jp/~kitamura/yozikken/netu9.htm>
- [13] 例えば, 村上謙吉, 『レオロジー基礎論』, 産業図書株式会社, (1991), p70.
- [14] 『化学辞典』, 東京化学同人, (1994).
- [15] 第3部その他の工業上重要な物質の性質, 3・5 水溶液, 表3・89 『流体の熱物性値集』, 日本機械学会, (1983), p479. オリジナルは International Critical Tables, Vol.5 (1926), 23, Bingham and Jackson, Bur.Standards Bull., 14, (1919), 59.
- [16] リメディアル☆フィジックス, 監修 大学物理教育協議会 江尻有郷, 並木雅俊  
 本学部内では以下のURLで見ることができる。  
<http://edweb.ed.niigata-u.ac.jp/physics/>