

大学初年度の自然科学基礎実験に関する一考察

米山 輝子

北海道大学工学部応用化学科

A Discussion on a Basic Laboratory Course of Natural Science for Freshmen

Teruko Yoneyama

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract — Problems in laboratory courses in the education of natural science are pointed out and discussed. Freshmen have little experience of laboratory work at the beginning of their career in the university. Here, effective systems and themes concerning a basic laboratory course of natural science are proposed for freshmen to improve their laboratory techniques and to acquire proper scientific concepts.

1. はじめに

学生実験は自然科学に対する興味を引き出し原理や法則の理解を助ける重要な手段であり、また研究方法を習得する訓練として欠くことができない。高等教育においても講義と並行して学生実験を有効に行なうことは意義が大きい。著者は長年にわたって本学工学部化学系の2年生及び3年生の学生実験を担当してきたが、特に近年、基本的実験操作及びデータ処理に関する学生の未熟さに驚かされることが多い。たとえば酢酸ナトリウム水溶液 100 cm³ を調製しようとする場合、量りとした酢酸ナトリウムをメスシリンダーに入れた後に水を 100 cm³ の目盛りまで加えて薬さじで攪拌しようとする。あるいは実験テキストを最後まで目を通さずに実験を始め、実験途中で必要な器具や薬品を探しに行く。また有効数字を無視して小数点以下 10 桁の数値を書くなどである。

このような基本的操作やデータ処理は実験の経

験を積み重ねることによって徐々に改善されるが、限られた時間内で有効に習得させなければならぬ。そこで以下に大学初年度の自然科学基礎実験の一例として[質量及び容量の測定]実験を紹介し、その有用性を検討した。さらに高等学校の実験教育を含めた学生実験の問題点とその改善について考えてみた。

2. [質量及び容量の測定] 実験

以下に紹介する[質量及び容量の測定]実験は本学工学部応用化学科の『応用化学実験Ⅰ』の基礎実験(北海道大学工学部応用化学科 1996)として行なわれているものである。個人実験である。ピペットの使用法及び化学天秤の使用法を習得するとともにデータの統計的処理法を学ぶことができる。大学初年度の『自然科学基礎実験』として基本的実験技術及び初歩的なデータ処理法の指導に適していると思われるのでここに紹介する。

2.1 実験の目的

全量ピペット（図1）の正しい使い方を習得し，また実験値（ピペット排出体積）の取り扱い方についても習得する。ピペット排出体積が日本工業規格（JIS）（日本規格協会 1994）（表1）に適合しているか検討する

2.2 方法

全量ピペットに標線まで蒸留水を吸い上げ，共栓付三角フラスコに排出した。化学天秤により三角フラスコの質量増加を測定して排出質量（ W_i / g）とし，蒸留水の水温の測定値を用いて W_i を20.0における排出体積（ V_i / cm^3 ）に換算した。この操作を5回（ $i = 1 \sim 5$ ）繰り返し，異常なデータがないかをt検定により検定した。異常がなければ V_i の平均値 V_{av} ，排出体積標準偏差 σ 及び相対標準偏差 σ / V_{av} を求めた。これを以下の3種の場合について行なった。

実験 i

呼び容量の異なる2種の全量ピペット（2，4あ

るいは5 cm^3 ）を用い，排出体積のばらつきを調べる。

実験 ii

4 cm^3 の全量ピペットを1回用いる場合と2 cm^3 の全量ピペットを2回用いる場合の排出体積を比較する。

実験 iii

同一の全量ピペットを用い，排出法を変えて排出体積を比較する。

2.3 結果

実験 i

図2に2 cm^3 及び5 cm^3 の全量ピペットを用いて測定した V_i の代表的結果を数直線として示した。なお，図2中の許容範囲はJISに基づいて示した（図3，4，5，9中の許容範囲も同様）。ばらつきが大きい実験者（A及びC）ではピペットを用いた実験から得たデータの再現性が悪いことが予想される。ばらつきが小さく， V_{av} が呼び容量に近い（Bの5 cm^3 及びDの2 cm^3 ）場合は実験

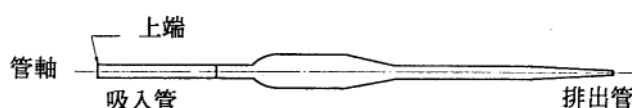


図1 全量ピペット

表1 全量ピペット排出体積許容誤差

呼び容量 / cm^3	2 以下	10 以下	20 以下	25 以下	50 以下
体積許容誤差 / cm^3	± 0.01	± 0.015	± 0.02	± 0.03	± 0.05

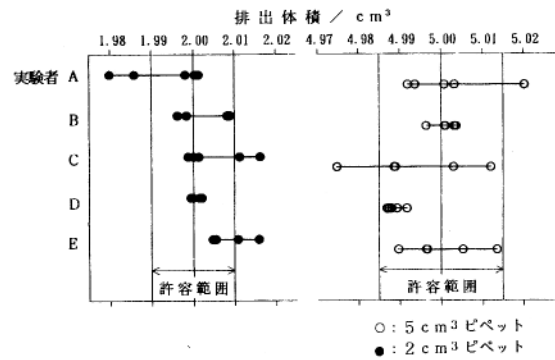


図2 実験者による排出体積のばらつき

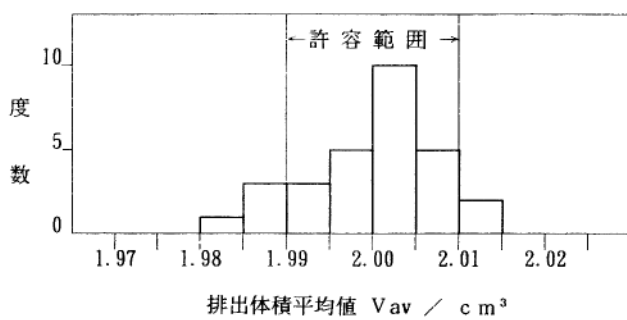


図3 2 cm³全量ピペットの排出体積平均値の分布

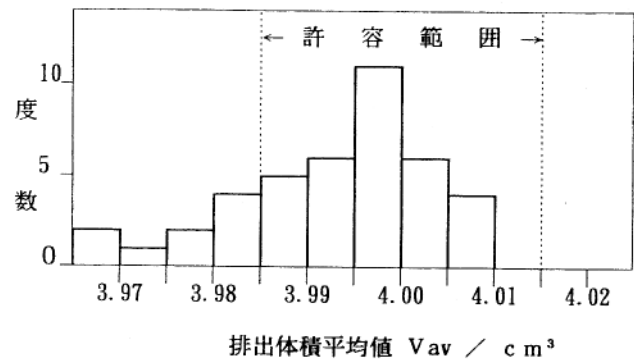


図4 4 cm³全量ピペットの排出体積標準偏差の分布

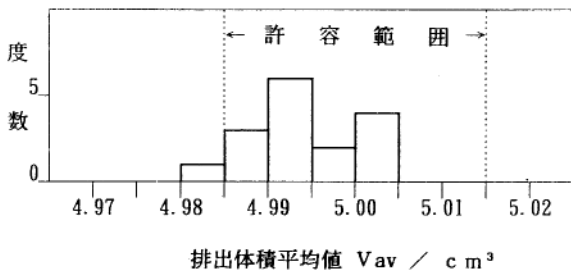


図5 5 cm³全量ピペットの排出体積平均値の分布

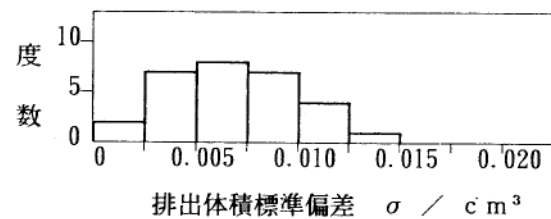


図6 2 cm³全量ピペットの排出体積標準偏差の分布

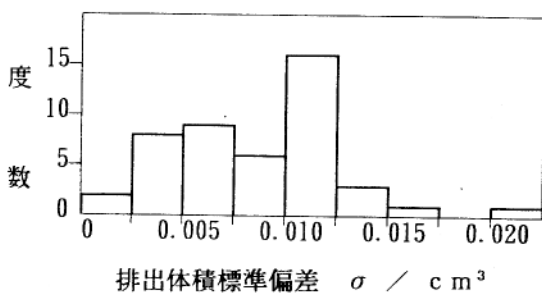


図7 4 cm³全量ピペットの排出体積平均値の分布

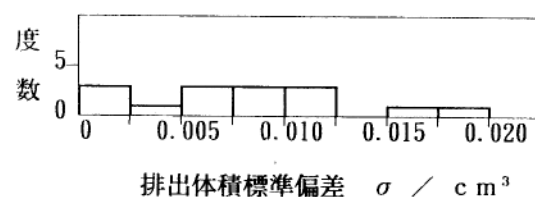


図8 5 cm³全量ピペットの排出体積標準偏差の分布

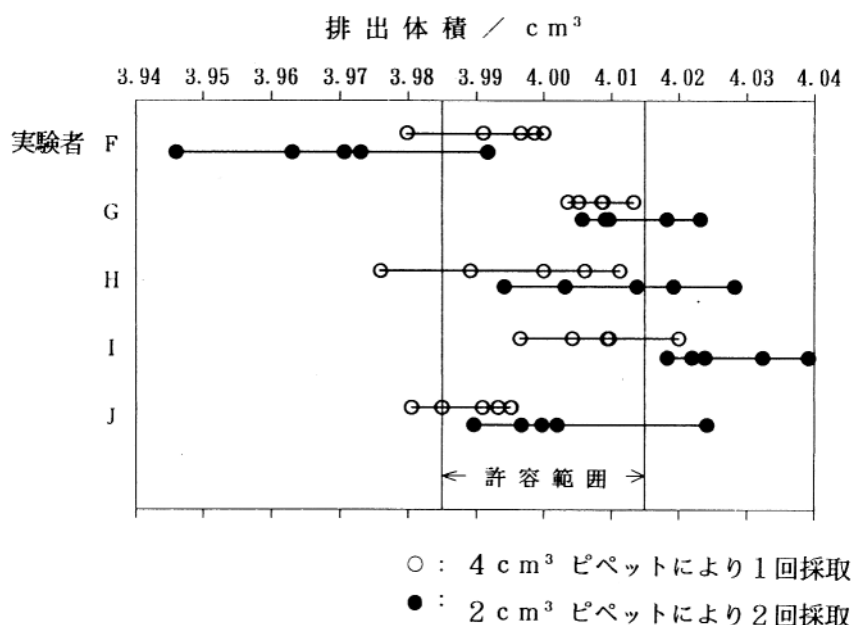


図9 採取回数による排出体積の変化

結果の再現性及び精度がともに優れていると予想できる。

また図3, 4及び5にそれぞれ 2 cm^3 , 4 cm^3 及び 5 cm^3 の全量ピペットを用いて測定した V_{av} の分布を示した。1～2割が許容範囲を越えた。図6～8には排出体積標準偏差 σ の分布を示したが, 個人差が大きく, σ は広い範囲に分布した。 σ / V_{av} は呼び容量が大きいほど減少するので精度よい実験を行なうには容量の大きいピペットを使用すべきであることが理解されるであろう。

実験 ii

図9に採取回数による排出体積の変化を示した。同一体積の水を採取するのに呼び容量の小さいピペットで2回採取する方が V_i の分布は広がり, σ は大きくなる。この結果から学生は1回で採取できる容量のピペットを用いる必要性を学習できる。

実験 iii

排出するとき先端に残った水について, 日本製のピペットは計量法に基づいてピペットの上端を指でふさぎ, 胴部を手のひらであたためて排出する(あたため法)ように製作されている。国際的にはピペット先端を容器内壁に触れながら一定時

間保った後にピペットを取り去る方法(ISO法)が普及している。この2方法による排出量の変化を図10に示した。呼び容量 4 cm^3 のピペットについて V_{av} が『ISO法』では『あたため法』に比べて約 0.03 cm^3 少なく, ほとんどの V_i が許容範囲外であった。したがって高い精度の実験をする際には使用するピペットの排出体積を排出法一定のもとに測定し, あらかじめ V_{av} を算出しておかなければならないことが理解できる。

2.4 本実験の有用性

以上の実験を行なって測定データを数直線上にプロットすると自分のピペット操作の優劣が一目瞭然である。 V_{av} が許容範囲内にあることが必要であり, 範囲内にあっても $V_{av} \pm \sigma$ が範囲外であれば正しい採取ができない。特に σ が大きい学生は操作に熟練する必要を痛感するであろう。

検定を行い, 平均値や標準偏差を算出する際に有効数字の取り扱い法の指導も必要である。 V_i (5桁の数値)から平均値 V_{av} を求めるとき, 桁が多いほど信頼できると考えて電卓が表示したまま書く学生がいる。標準偏差 σ を求めるときには($V_i - V_{av}$)の有効桁数は2～3桁となり, これに従っ

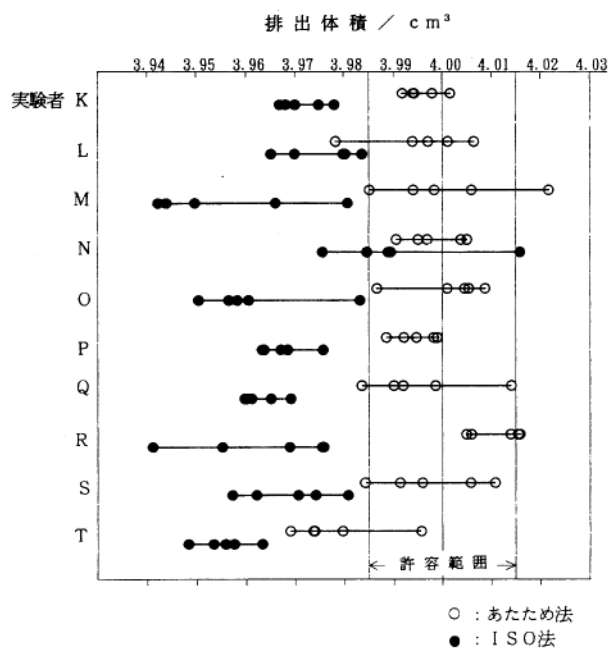


図 10 排出法の違いによる排出体積の変化

て σ の有効桁数が決まることも指導しなければならない。本実験でのデータ処理法の習得はその後の学生実験におけるデータ処理に非常に有効であった。

3. 高等学校における実験教育の実態

学生が基本的な実験操作に未熟であるのはなぜか知るために、大学入学以前の実験教育について調べてみた。図 11 は高等学校化学の授業中に行なった実験の回数について 1995 年に本学工学部応用化学科2年生30人にアンケートをとった結果である。半数の学生は2年間に数回であり、多い学生でも1ヶ月に1回以下であった。

例えば北海道札幌西高等学校の場合、理系の生徒は2年間に次の12テーマの実験(井口、木下ら1994)を行なった。

- ・ 基本操作
- ・ 炭酸カルシウムの塩酸添加による質量減少
- ・ 水酸化鉄(III)コロイドの性質
- ・ 塩酸などの酸の水酸化ナトリウムによる中和
- ・ 塩素ガスの生成及びその性質
- ・ Na, Ca 及び Al 化合物の性質

- ・ Cu, Ag 及び Fe 化合物の性質
- ・ 化学平衡(N_2O_2 の解離など)
- ・ 炭化水素の反応
- ・ アルコール及びアルデヒドの性質
- ・ フェノールの性質及びセッケンの合成
- ・ 中性洗剤の合成及びアニリンの性質

これらのテーマについて実験を各50分で行なう。器具や試薬は実習助手が準備するが、実験時間中は教師1人が生徒45人を指導する。生徒は実験結果が法則などにあてはまるかどうかを検討してB5版2枚程度のレポートを書くか、あるいは教師の作ったプリントの課題に答える。多くの場合、レポートの最後に感想(面白かった、失敗だった等)を書く。

多くの教師が実験を通して化学に対する興味を生徒に持たせようと努力している。化学の実験が面白かったから化学系に進学したという学生もよく見られる。中高校時代の印象深い実験として『アンモニアの噴水』実験(図12)(近角ら1991)を挙げる学生が多いのも実験がもたらす効果をよく表している。生徒は興味を持って実験し、実験の時間を楽しみにしているという。しかし残念なことに全国の高校で大学入学試験準備のために講

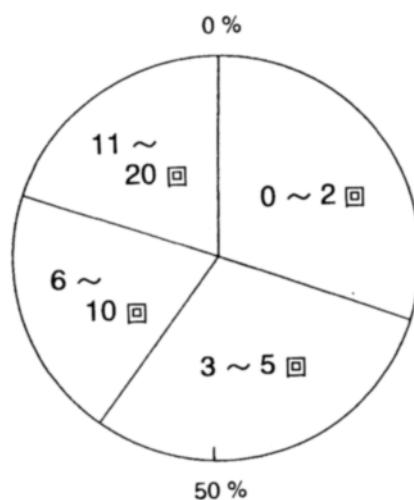


図 11 高等学校化学における学生実験回数
（本学応用化学科2年生へのアンケートによる）

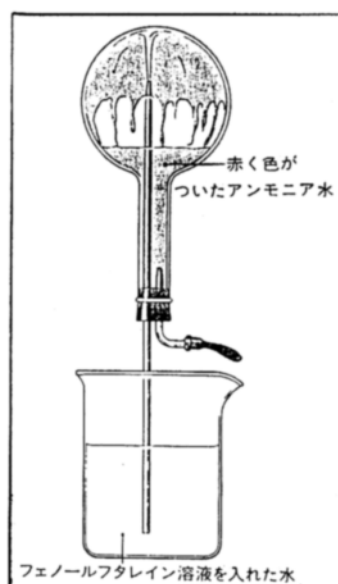


図 12 「アンモニアの噴水」実験

義・演習の割合を増やし，時間のかかる実験を省く傾向が見られる。

さらに1997年度入学の学生から新教育課程となり，理系の多くの学生は理科として化学，物理，生物あるいは地学の中から2科目（各7単位）を履習してくる。これまでの理科Ⅰ（物理，化学，生物，地学及び環境について概略的に学習する）は廃止となっている。そのため，化学系の学科に入学する学生の自然科学に関する知識は個人差が

ある。

4. 本学全学教育における実験教育の実態

では，大学初年度の実験教育はどうであろうか。本学では1年前期及び後期に「自然科学基礎実験」として『物理実験』，『化学実験』，『生物実験』及び『地学実験』（各1単位）を開講し，工学部化学系学科ではこのうち『物理実験』，『化学実験』

及び『生物実験』の中から2科目計2単位を選択必修としている。実験は毎週1回, 第4講目及び第5講目(14:40 ~ 17:30)に7回にわたって行われる。

『化学実験』(北海道大学自然科学基礎実験化学実施委員会 1995)ではガイダンス(1回)の後, 次の6種類の実験を行なう。

- ・キレート滴定 (Ca^{2+} , Mg^{2+} —EDTA)
- ・pHの測定とpH滴定曲線 (NaOH — HCl , Na_2CO_3 — HCl)
- ・化学反応の速度 (H_2O_2 の接触分解)
- ・酢酸エチルの合成
- ・アセチルサリチル酸の合成と同定
- ・平衡定数 (AgCl の溶解度積など), または反応熱 (酸—塩基中和熱など), またはNi錯体水溶液の吸収スペクトル

実験は2人1組で1テーマを各1日で行なう。指導教官は学生60人に対して3人である。毎回40分間の実験内容の講義(OHPなどを利用)の後, 実験を行なう。

実験に費やすことのできる実質的な時間は約2時間であり, 時間内に終わるよう内容も吟味され, 器具や装置の準備も万全である。化学の全分野について偏らないテーマが選ばれている。時間の関係から必要な溶液は実験補佐員があらかじめ用意しておき, 学生は溶液調製をほとんど行なわない。1週間以内にデータを整理してレポート(5枚程度)を作成, あるいは結果や課題の解答を書き込むプリントを完成させて提出する。指導教官によっては添削して返却したり, さらに操作についての簡単なテストを行ったりしている。学生のレポート作成への努力はおおいに認められる。

5. 本学専門教育(工学部応用化学科)における実験教育の実態

本学工学部応用化学科では2年後期に『応用化学実験Ⅰ』(2単位), 3年前期に『応用化学実験Ⅱ』(3単位), 3年後期に『応用化学実験Ⅲ』(2単位)

を必修としている。

『応用化学実験Ⅰ』は週2回, 約2時間半である。ほとんどが2人~3人1組で行なう。安全教育を含むガイダンスの後, 基礎実験(天秤, 容量器具の使い方, 洗浄方法, データ処理及びレポートの書き方)を4回行なう。その後, 分析化学実験8回, 物理化学実験15回を行なう。

1年生の自然科学基礎実験と類似したテーマが多いが, 先のアンケートによれば『重複したテーマは無駄である』と考える学生より『基礎実験では十分理解できなかったのもう1度実験できてよかった』, あるいは『繰り返すことによってさらに理解が深まるのでよかった』と考える学生が多く, 『器具の使い方, レポートの書き方なども確認できた』とのコメントもあった。

また, 学生40人に対して指導教官は8人であったので『実験手順, 操作法や理論についてすぐに質問できた』という学生が多かった。

学生はほとんど予習しないで実験の説明講義を受ける。逐次テキストを読みながら実験する者が多い。

レポートはA4版レポート用紙6~10枚程度を作成, 実験終了の1週間後までに提出する。教官はこれを添削して返却する。返却にあたっては不備な点を指摘し, 書き改めて再提出させることが多く, 再々提出も要求している。指導者は多数のレポートを添削する作業を要求されるが, レポート作成について学生の上達はめざましい。

なお, 『応用化学実験Ⅰ』の開始時には未熟な操作が続出し, 安全面からも教官は目を離すことができない。先に掲げた例の他に次のような操作が見られた。

- ・精密天秤の中や上皿天秤の周囲に薬品をこぼしたまま放置する。
- ・薬品のラベルを確認せず, 誤った薬品を量り取る。
- ・精秤値を記録しない。
- ・ピペットを用いるとき有機溶媒を口で吸ったり水を安全ピペットで吸ったりする。

- ・濃硫酸をメスフラスコに入れ，水で希釈して希硫酸を調製する。
- ・ピペットの共洗いをしなかったり，被滴定溶液を入れるコニカルビーカーを共洗いしたりする。
- ・被滴定溶液をメスシリンダーで量りとる。
- ・片手をポケットの中に入れたまま滴定したり，2人がかりで滴定したりする。
- ・ブンゼンバーナー燃焼時に空気を入れなかったり，入れ過ぎてバックファイヤーを起こしたりする。
- ・濃アンモニア水をビーカーに入れて実験台上に放置したり，流しにそのまま捨てたりする。

6. 他大学の全学教育における自然科学基礎実験の実態

他の大学の初年度の実験教育はどのように行なわれているか，東京大学及び京都大学について調べた。

(1) 東京大学

1年後期及び2年前期の1年間にわたって『基礎実験』（4単位）（東京大学教養学部基礎実験委員会1995）を週1回13:00～16:10の3時間，1回1テーマ，計25～26テーマについてローテーション方式で行う。実際は17:30まで開室しているので16:10を過ぎても延長して実験していることも多い。物理，化学，生物，身体科学各分野から進学コース毎に決められたテーマを2人1組で実験する。例えば工学部化学系に進学する学生は物理系12テーマ，化学系12テーマ及び生物系1テーマについて実験する。

また，理学部化学系の一部や薬学部進学生は物理系5テーマ，化学系9テーマ，生物系11テーマ，身体運動科学系1テーマの計26テーマを行う。

物理系及び生物系では実験終了後に，結果を解析し，実験ノートを教官に提示して試問を受ける。学期末に実験ノートを提出し，レポート提出の必要はない。化学系及び身体運動科学系では実

験終了後，ノート，サンプル，グラフ等を教官に提示し，実験報告を行なう。さらに1週間後レポートを提出する。再提出は要求しない。

(2) 京都大学

1年前期あるいは後期に『分析化学及び環境化学実験』（2単位）（京都大学総合人間学部1994）として週1回13:00～16:15の3時間をあて，1回の講義及び12回の実験を行なう。大半の理系学生及び一部の文系学生が履修しており，理系学生は進学学科に応じて複数の自然科学実験を履修している。この『分析化学及び環境化学実験』は伝統的な金属陽イオンの分離・定性実験であり，個人実験である。全員が同時に同一の実験を行なう。化学を専攻する学生にとっては2年生の『測定及び合成実験』への基礎となる。また非化学系学生や文系学生にとっても自然科学的思考を学ぶのに有効であると考えられる。実験の翌日にA4版レポート用紙1枚のレポートを提出し，指導教官が添削して翌週の実験日に返却する。論文作成の基本訓練としてきめ細かく指導している。旧教養部系の教官とともに全学の化学系学科の助手が協力して120名の学生に対し5名で指導している。

この他に工学部化学系及び農学部化学系の2年生に対しては前期あるいは後期に『合成及び測定実験』（2単位）（京都大学総合人間学部1996）として13:00～16:15の3時間をあて，1回の講義と有機合成，無機合成，分析及び物理化学について12回の実験が組まれている。これも完全な個人実験であり，30人が同時に同一の実験を行なう。予習をしてくる学生の割合は多くないという。レポートは枚数制限なしで実験終了後5日以内に提出し，次回の実験中に不十分な点を指摘する。学生の進学先に合わせて工学部化学系あるいは農学部化学系の助手を含む4名の指導者が60名の学生を指導する。

7. 大学初年度の実験教育はどうあるべきか

自然科学基礎実験については本学高等教育機能開発総合センターですでに検討されている(徳田 1996, 徳永 1996, 市川, 吉田 1996)が, 以上の実態を踏まえて大学初年度の実験教育について考えてみた。

7.1 大学初年度の自然科学基礎実験の受講者の多様性

自然科学基礎実験のうち化学実験を履修する学生は次の4種に分類される。

- a. 化学を専門とする学生(化学系, 薬学系など)
- b. 化学を必要とするa以外の学生(医学系, 環境系など)
- c. ほとんど化学を必要としない理系の学生(物理系, 機械系, 土木系など)
- d. 化学に興味のある文系の学生

aの場合は2年生以降にもう1度, 類似の実験を繰り返すので, 初年度ではむしろ非常に基本的な実験操作を習得することを期待されている。bの場合, この初年度の基礎実験を履修することによって化学実験修了と考えて2年生以降のカリキュラムが作られているため, なるべく広い分野の化学実験を経験することを期待されている。cの学生は化学実験を通して自然科学としての基本的な考え方を習得することを期待されている。dの学生は自然科学的な考え方を学びたい, あるいは化学の面白さに触れたいと考えている。このような多様な学生に対して, 現在のように同一のテーマを与えるのではなく, それぞれの要求を満たすようなカリキュラムを用意すべきであろう。

7.2 実験テーマの適切な選択

これらの多様な要求に対処する方法として(Ⅰ)専門学科ごとに学科の要求を満たす独自のテーマで実験し, 指導も専門学科教官が行なう, あるいは(Ⅱ)多様なテーマを用意し, 学科ごとにこの中から適当なテーマを選んで専門学科教官の協力を得て指導する方法がある。この場合, 前節c及びdの学生に対する指導の問題が残る。

もう一つの方法としては(Ⅲ)全学生に対して化学分野に限らず一律に自然科学の基本的考え方を指導する方法がある。その内容は(i)重量, 容量, 温度, 圧力, 濃度などの基本的な量を測定してデータの取り扱いを習得させること, (ii)無機定性実験や有機合成実験, あるいは顕微鏡観察のように定性的な推論法を習得させること, 及び(iii)物理化学実験のように定量的な推論法を習得させることであろう。

(i)の具体的な例としては2.に紹介した[重量及び容量の測定]がある。また熱電対の校正や溶液の吸光度の検量線作成を行なった後に未知試料について測定する実験などもよい。

実験日数及び時間が十分あれば(i), (ii), (iii)のすべてについて物理, 化学, 生物など広い分野にかかわる実験を行うことが望ましい。日数及び時間が十分でないときは(i)のみ, あるいは(i)及び(ii)のみとする。実験準備や片付け, 実験ノート の書き方, 基本的な操作法も指導できる。文系の学生についてもこれらの実験を通して自然科学に対する認識を新たにするであろう。

7.3 適切な指導の必要性

器具・装置の面で制約があるが, 予習の必要性及び技術の修得の面で個人実験が最も有効である。実験操作については積極的に助言あるいは指導が必要であり, 特に安全面への配慮は講義だけでは不十分であるから実験中にその場で注意しなければならない。学生は経験を重ねるに従って技術も向上し, 自主的に実験できるであろう。

データが得られたら実験時間内にこれを整理させ, プロットが必要であれば行わせる。指導者はデータ整理が完了したことを確認し, 失敗や誤りがあれば再実験させるのが望ましい。

高校での実験レポートの経験が少ないので基本的なレポート作成の指導から始める必要がある。提出されたレポートは添削して指導することが必要である。また実験日内にデータ整理してノートを提出させることも一案であろう。

8. 終わりに

大学においては研究が重視されているが,教育水準を高めることは社会に対する大学の義務であり,ひいては研究水準を押し上げるものと考ええる。実験教育もその一環であり,本学でもユニークかつ有効な教育方法が確立することを願ってやまない。

謝辞

2. に記した『質量及び容量の測定』実験を考案された北海道大学工学部応用化学科金野英隆先生にはここに実験を紹介することに同意いただき,また貴重な助言をいただいた。北海道札幌西高等学校化学研究科三好敬一先生,北海道大学地球環境科学研究科長谷部清先生,北海道大学工学部原子工学科住吉 孝先生,同藤吉亮子先生,北海道大学工学部応用化学科上館民夫先生,同小泉 均先生,東京大学教養学部化学教室平沢 先生,京都大学総合人間学部自然環境学科片桐 晃先生,同山口良平先生には実験見学,資料提供,討論など多大のご協力をいただいた。厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 近角聡信,長倉三郎,江上信雄ら(1991),『新しい化学1分野上』,31,東京書籍
- 北海道大学工学部応用化学科編(1996),『応用化学実験Iテキスト』
- 北海道大学自然科学基礎実験化学実施委員会編(1995),『自然科学基礎実験(化学)』
- 市川和彦・吉田登(1996),『高等教育ジャーナル』(北大),1,48
- 井口洋夫,木下實ら(1994),『化学IB,II』,実教出版
- 京都大学総合人間学部編(1994),『無機定性分析実験』,共立出版
- 京都大学総合人間学部編(1996),『測定及び合成実験テキスト』
- 日本規格協会(1994),『JIS R 3505 ガラス製体積計』
- 徳田昌生(1996),『高等教育ジャーナル』(北大),1,39
- 徳永正晴(1996),『高等教育ジャーナル』(北大),1,45
- 東京大学教養学部基礎実験テキスト編集委員会編(1995),『基礎実験I』,東京大学出版会
- 東京大学教養学部基礎実験運営委員会編(1995),『基礎実験補遺』,東京大学出版会