

# マイクロスケール実験によるエタノールと水の密度測定

中 川 徹 夫

## Density Measurements of Ethanol and Water using Microscale Experiments

NAKAGAWA Tetsuo

### Abstract

Densities of liquids such as ethanol and water have been measured using microscale experiments at room temperature. Instead of an even balance and an ordinary graduated cylinder, an electronic balance and a 5- or 10-mL graduated cylinder have been used as equipments. Observed densities of ethanol and water are  $(0.779 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  and  $(0.991 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  respectively, and these values are in good agreement with references. In this procedure, the least amount of ethanol or water used for a density measurement is ca. 1.5 mL and it takes ca. 2 minutes. That is, both the amount of reagents and the experiment time are drastically reduced comparing with those in the ordinary experiments. Moreover, our microscale experiment is simpler than the traditional one with a pycnometer because densities are directly measured, not obtained via specific gravity to pure water. Therefore, it has been clarified that our microscale experiment on measuring densities of liquids is useful and informative as teaching materials for high school science.

**キーワード:** マイクロスケール実験、密度、エタノール、水

**Key words:** microscale experiment, density, ethanol, water

## 1 はじめに

### 1-1 身近な物理量である密度

物質の密度は最も基本的な物理量の一つであり、単位体積当たりの質量で定義される。すなわち、物質の質量を  $m$ 、体積を  $V$  とすれば、密度  $d$  は次式により算出できる。

$$d = \frac{m}{V} \quad (1)$$

物質間の密度の相違は、日常生活においてもしばしば経験される。具体的には、「同体積の鉄板とアルミニウム板を手にとれば、前者の方がはるかに重く感じられる」、「水の入った容器に鉄製スプーンやアルミ缶、ガラス玉、岩石片を入れると水に沈むのに対して、食用油や灯油、割箸（木片）、ストロー（ポリエチレン）を入れると水に浮く」などの事例が挙げられる。このように、密度は我々にとってたいへん身近で馴染みやすく、感覚的にも捉えやすい物理量である。

### 1-2 中学校理科における密度の指導内容の現状と問題点

現行の中学校学習指導要領理科編（以下、指導要領と略記）<sup>1)</sup>によれば、密度は中学校理科第1分野で取り扱うこととされている。それゆえ、物質の密度に関する教材開発・改良の研究は、中学校理科教育の内容を充実させるためにも極めて重要である。指導要領には、「身近な固体の物質などを取り上げ、それらについて密度や加熱したときの変化などを調べる観察、実験を行う。例えば、金属やプラスチックなどの様々な固体の物質の密度を測定する実験を行い、求めた密度から物質を区別できることに気づかせたり、…」という記述が見られる。加えて、中学校理科教科書（以下、教科書と略記）<sup>2)</sup>にも、物質を密度で区別する方法や上皿天秤とメスシリンダーを用いた固体の密度測定法が紹介されている。このように、中学校理科では主として固体の密度について取り扱われ、液体や気体の密度についてはごく簡単に紹介されているに過ぎない。

指導要領や教科書の記述に従い、上皿天秤で固体の質量  $m$  を、メスシリンダーで固体の体積  $V$  を測定すれば、式(1)により固体の密度  $d$  を算出できる<sup>3)</sup>。しかし、実際に固体の密度測定に関する実験を理科の授業で取り扱う際に、つぎのような問題が生じる。

第一は、上皿天秤の使用に伴う所要時間の問題である。バネばかりとは異なり、上皿天秤には質量それ自身を測定できるという長所がある。しかし、試料と分銅のバランスと取るのにかなりの時間を要することは避けられない。小学校で上皿天秤を使用した経験を持たない生徒には、なおさらである。質量のみを測定する実験であれば上皿天秤を用いてもよいが、密度を算出するには質量以外に体積も測定しなければならない。中学校の授業時間は1校時50分である。この限られた時間の中で、教員から実験の説明を受け、実験（試料の質量と体積の測定）

を実施し、得られた実験データを整理して密度を算出するに至るまでのすべての内容をこなすためには、相当手際よく行わなければならない。教科書の記述に従い、質量を測定するのに上皿天秤を使用するのは、時間的にかなり無理があるように思われる。

第二は、通常サイズのメスシリンダーの使用に伴う試料の量の問題である。中学校理科で使用するメスシリンダーの容積は、30 mL から100 mL 程度であることが多い。これらを用いる場合には、グループで実験を実施する場合にしても、大量の試料が必要となる。

第三は、固体の体積測定に伴う所要時間の問題である。固体試料の場合、体積の測定はそれほど容易ではない。試料が粉末状固体の場合、メスシリンダーで体積を測定すれば空隙が生じる可能性がある。また、試料が粒状や塊状固体の場合、予めメスシリンダーに水を入れてその体積  $V_f$  を測定し、つぎに試料を加えて全体積  $V_t$  を測定する。試料の体積  $V$  は、

$$V = V_t - V_f \quad (2)$$

から算出できる。その際、試料の表面に気泡が付着する、あるいは、試料を入れる際に水が跳ねてメスシリンダーの器壁に付着する場合が想定される。また、一度の実験操作で、 $V_t$  と  $V_f$  の二回体積を測定するのに加えて、メスシリンダーの最小目盛りの1/10まで目分量で測定しなければならない。これらの操作を行う際、メスシリンダーの取り扱いに不慣れた生徒には、かなりの時間が必要になると推測される。

### 1-3 密度の取り扱い上の問題点に対する解決策—マイクロスケール実験の導入—

以上のような問題に対して、つぎに述べるような解決策が考えられる。

第一の問題に対しては、上皿天秤に代わり、電子天秤の使用を提案したい。電子天秤の長所は、質量が即座にデジタル表示され、測定時間を短縮できる点にある。最近では廉価な電子天秤も販売されているので、中学校の現場でも手軽に使用できる。

第二の問題に対しては、通常サイズのメスシリンダーに代わり、よりサイズの小さい5 mL や10 mL のメスシリンダーの使用を提案したい。これは、通常実験の規模を小さくしたマイクロスケール実験<sup>4)</sup>の発想に基づくものである。マイクロスケール実験に関しては、実験書<sup>4-6)</sup>やホームページ<sup>7-8)</sup>で具体的な事例が紹介されている。全世界の化学者がマイクロスケール実験の長所に注目しており、最近開催された化学関連の国際会議でも、多くの研究発表が行われた<sup>9-10)</sup>。著者も、これまで主として科学研究費補助金や研究助成金により、小学校から中学校、高等学校、大学と、幅広い校種に対応したマイクロスケール実験の教材開発・改良に関する研究やその普及活動に取り組んできた<sup>11-20)</sup>。

第三の問題に対しては、固体試料に代わり、液体試料の使用を提案したい。液体の場合、最初の体積が試料の体積に相当するため、固体試料ように二回測定する必要はなく、実験時間の短縮につながる。ただ、液体試料の中には、常温で蒸気圧が高く危険性や毒性の大きいものも多いので、できる限り安全性が高く廉価な試料を用いる必要がある。

以上の三点を総括すれば、マイクロスケール実験の手法により、比較的危険性や毒性の小さ

い液体試料の密度を電子天秤と小型メスシリンダーで測定すればよいと考えられる。

本研究では安全面に留意して、試料としてエタノールと水を選び、マイクロスケール実験の手法によりこれらの密度を測定した。そして、本手法の中学校理科実験教材としての有用性について検討した。さらに、著者が担当する「物理学実習（講義を含む）」の授業でも実践したので、以下に報告する。

## 2 実験

### 2-1 試薬と器具

試薬として、和光純薬 1 級のエタノールおよび ADVANTEC 社製の蒸留水製造装置アクエリアス RFD240NA で調製した水を使用した。質量測定には、METTLER TOLEDO 社製の電子天秤 PL202-s（最小測定値 0.01 g）を用いた。体積測定には、市販のガラス製メスシリンダー（容積 5 mL または 10 mL）を用いた。

### 2-2 操作

質量および体積測定は、いずれも室温下で実施した。

まずメスシリンダーの質量  $m_c$  を、0.01 g の位まで測定可能な電子天秤を用いて測定した。つぎに、メスシリンダーに、約 1.5 mL から 6.0 mL の範囲でエタノールを入れ、全質量  $m_{c+A}$  を測定した。そしてメスシリンダー内のエタノールの質量  $m_A$  を、

$$m_A = m_{c+A} - m_c \quad (3)$$

により算出した。続いて、メスシリンダー内のエタノールの体積  $V_A$  を、最小目盛りの 1/10 である 0.01 mL の位まで測定した。 $m_A$  と  $V_A$  より、エタノールの密度  $d_A$  を、式(1)により算出した。この操作を 20 回反復して  $d_A$  の平均値  $\bar{d}_A$  と標準誤差  $\sigma_{A,SD}$  を計算し、結果を  $(\bar{d}_A \pm \sigma_{A,SD})$  の形に整理した。具体的な実験手順を図 1 に示す。

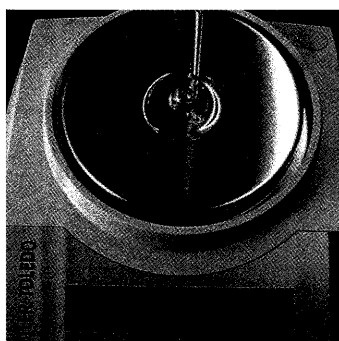
物質の密度  $d$  は、式(1)により算出できる。これを変形すれば

$$m = dV \quad (4)$$

となり、質量  $m$  は体積  $V$  に比例し、比例定数（傾き）が  $d$  に相当する。そこで、エタノール、水それぞれに関して  $m-V$  グラフを作成し、最小二乗法により  $m$  を  $V$  で式(4)に回帰すれば  $d$  が算出できる。本研究では、この方法も併用した。

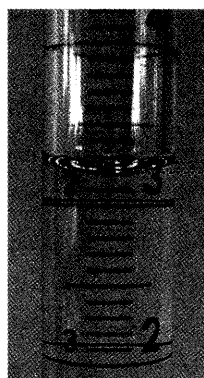
なお、密度測定後のエタノールに関しては、所定の容器に回収した。物理的および化学的な変化を受けていないので、他の実験用試薬として再利用が可能である。

水の密度  $d_w$  についても、エタノールの場合と同様に水の質量  $m_w$  と体積  $V_w$  を測定し、式(1)により算出した。エタノールの場合と同様にこの操作を 20 回反復して、 $d_w$  の平均値  $\bar{d}_w$  と標準誤差  $\sigma_{w,SD}$  を計算し、結果を  $(\bar{d}_w \pm \sigma_{w,SD})$  の形に整理した。



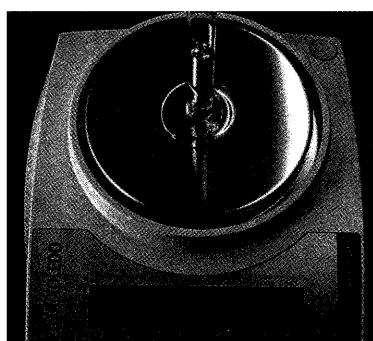
$$m_c = 17.52\text{g}$$

(1)



$$\cdots V_A = 3.19\text{ mL}$$

(2)



$$m_{c+A} = 20.02\text{ g}$$

(3)

図1 エタノールの密度測定の手順

(1)メスシリンダーの質量  $m_c$  を測定、(2)エタノールの体積  $V_A$  を測定、(3)(メスシリンダー＋エタノール)の質量  $m_{c+A}$  を測定。これより、エタノールの質量  $m_A$  は式(3)より、 $m_A = m_{c+A} - m_c = 20.02\text{ g} - 17.52\text{ g} = 2.50\text{ g}$ 、密度  $d_A$  は式(1)より、 $d_A = m_A / V_A = 2.50\text{ g} / 3.19\text{ mL} = 0.784\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ となる。

### 3 結果と考察

エタノールの密度の実測値  $d_A$  は、 $d_A = (0.779 \pm 0.001)\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ であった。標準誤差の値は極めて小さく、実験結果の再現性が認められた。25℃における文献値は、 $0.78496\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ である<sup>21)</sup>。本手法では、極めて簡素な器具を用いたにもかかわらず、得られた実測値は、文献値に近い値であることが判明した。

参考までに容積約 10 mL の比重びんを用いて、常温でエタノールの密度を測定したところ、 $0.787\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ であり、より文献値に近い値が得られた。しかし、実験操作に大変時間を必要とする。まず比重びんの質量を測定し、つぎに比重びんをエタノールで満たしてその質量を測定し、続いて比重びんを蒸留水で満たしてその質量を測定する。そして、水に対するエタノールの比重を求める。この段階では、エタノールの正確な密度は求まらない。そこで、水の密度を文献値<sup>22)</sup>から引用して、エタノールの比重に乘じ、エタノールの密度を算出しなければならない

い。理科教員が行う場合には全く問題はないが、注3にも述べたように、中学校理科の授業で利用できる方法ではない。

水の密度の実測値  $d_w$  は、 $d_w = (0.991 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  であった。エタノールの場合と同様に、標準誤差の値は極めて小さい。25℃における文献値は  $0.99705 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  であり<sup>21)</sup>、本手法によって得られた実測値はこれに近い値であることが判明した。

なお、エタノールおよび水の密度測定に要した時間は約2分であった。これより、中学校理科の1校時50分の授業時間内で、エタノールおよび水の密度を、少なくともそれぞれ10回ずつ測定できることが明らかとなった。質量と体積の測定から密度を算出し、その平均を求める操作は、中学生にとってそれほど困難ではない。

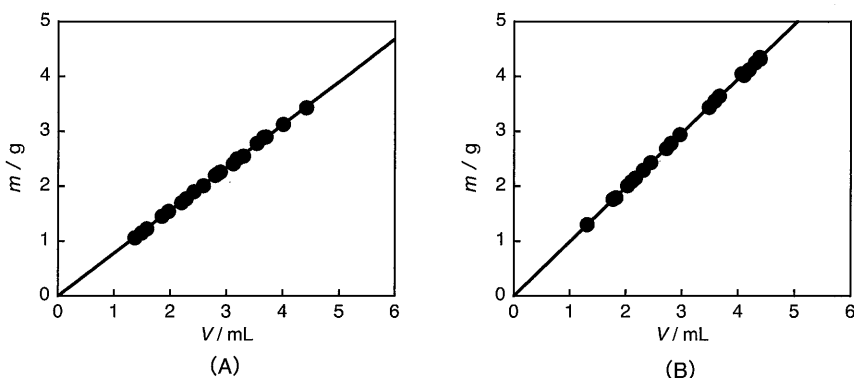


図2 エタノールと水の体積と質量の関係（著者による）

(A)エタノール (B)水

直線は最小二乗法により算出した回帰直線を表し、その傾きが密度である。

エタノールおよび水それぞれに関して  $m-V$  グラフを作成した。これを図2に示す。最小二乗法により  $m$  を  $V$  で式(4)に回帰したところ、下記の回帰直線が得られた。

$$m_A / \text{g} = (0.780 \pm 0.001) \cdot V_A / \text{mL} \quad (r = 0.9997) \quad (5)$$

$$m_w / \text{g} = (0.990 \pm 0.001) \cdot V_w / \text{mL} \quad (r = 0.9999) \quad (6)$$

式(5)および(6)において、 $r$ は相関係数であり、いずれの場合も極めて1に近い値が得られた。これより、得られた回帰直線は、エタノール、水のいずれに関しても有効であると判断できる。式(5)、(6)の傾きより、 $d_A = (0.780 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $d_w = (0.990 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  となり、上述の  $m$ 、 $V$  から算出した  $d$  の値と、ほとんど差異が認められなかった。また、図2より、エタノール、水のいずれの場合も、僅か1.5 mL程度の試料で、十分密度測定が可能であることが判明した。

中学校理科では、最小二乗法に関しては取り扱わない。そこで代案として、生徒がグラフ用紙にすべての実測値 ( $V_i, m_i$ ) をプロットし、定規を用いてできるだけ誤差が小さくなるように原点を通る直線を引き (回帰直線に相当)、その傾きから密度  $d$  を求めるように指導すればよい。比例に関しては数学の授業で履修済みであり、数学の復習としても有効である。

## 4 大学の授業「物理学実習」における実践

### 4-1 実践内容

2010年度に著者が担当する「物理学実習」の受講生は11名であり、すべて本学人間科学部環境・バイオサイエンス学科の2年生である。本学科の専門科目は生物学関係の科目を中心に構成されているため、受講生は物理学を専門としない。また受講生の大半が、高等学校で「物理Ⅰ」または「理科総合A」までしか履修していないか、全く物理関係の科目を履修していないのが現状である。そこで、少しでも物理学に慣れ親しめるように、身近な物理量である密度の測定実験を取り入れた。

受講生には、著者が提案した方法によりエタノールと水それぞれに関して5回ずつ密度を測定するように指示した。

### 4-2 受講生が算出したエタノールと水の密度

受講生の報告に基づき、エタノール、水の密度  $d_A$ 、 $d_W$  それぞれに関して得られた測定データ55個 (11名の受講生が各々5回ずつ測定したので、全部で55個) について、平均値および標準誤差を算出したところ、 $d_A = (0.769 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $d_W = (0.972 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  であった。

著者の例に倣い、受講生のデータをもとにエタノールおよび水それぞれに関して  $m-V$  グラフを作成した。これを図3に示す。最小二乗法により  $m$  を  $V$  で式(4)に回帰したところ、下記の回帰直線が得られた。

$$m_A / \text{g} = (0.770 \pm 0.002) \cdot V_A / \text{mL} \quad (r=0.9974) \quad (7)$$

$$m_W / \text{g} = (0.973 \pm 0.002) \cdot V_W / \text{mL} \quad (r=0.9972) \quad (8)$$

式(7)および(8)において、相関係数  $r$  は1に近く、得られた回帰直線はエタノール、水のいずれの場合に関しても有効である。式(7)、(8)の傾きより、 $d_A = (0.770 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $d_W = (0.973 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$  となり、上述の  $m$ 、 $V$  から算出した  $d$  の値と、ほとんど差異が認められなかった。しかしながら、エタノール、水いずれの場合も、密度の実測値と文献値の差や実測値の標準誤差は、著者が算出した値よりも大きくなった。この原因としては、エタノールや水の体積を測定する際、目の位置がやや不適切であり、目分量で読み取る際の測定誤差が生じたためと推察される。

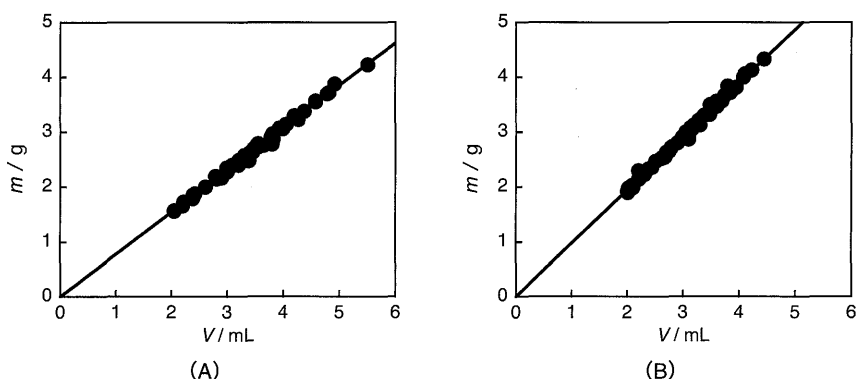


図3 エタノールと水の体積と質量の関係（物理学実習の受講生による）

(A)エタノール (B)水

直線は最小二乗法により算出した回帰直線を表し、その傾きが密度である。

## 5 おわりに

中学校理科では、上皿天秤と通常サイズのメスシリンダーを用いて、固体試料の密度を測定する実験が取り扱われている。しかし、上皿天秤を用いれば質量測定に、固体試料を用いれば体積測定に時間を要する。加えて、通常サイズのメスシリンダーを使用すれば、少量の試料では密度測定が困難で、ある程度の量を必要とする。そこで、マイクロスケール実験の手法により、固体試料に代わって液体試料であるエタノールと水の密度を、電子天秤と小型メスシリンダーで測定する方法を提案した。その結果、少量の試薬量で簡便かつ迅速に密度を測定することができ、実測値も文献値に近い値が得られた。1回の密度測定に要した時間は約2分であり、約1.5 mLという少量の試薬でも測定可能であることが判明した。また、密度測定後のエタノールは、再利用が可能である。

以上のように、本手法は中学校理科の実験教材として極めて有用性が高いと判断できる。

今後、エタノールや水以外の比較的毒性・危険性の少ない溶液（たとえば塩化ナトリウム水溶液、ショ糖水溶液など）に関する密度測定のマイクロスケール実験に関しても、教材化の観点から検討を進める予定である。

本研究の一部は、科学研究費補助金〔中川徹夫代表、基盤研究(C)20500748〕および2010年度神戸女学院大学研究所研究助成金〔中川徹夫代表〕により行われた。また、実験および授業実践の準備に、椎葉昌美嘱託教学職員の協力を得た。ここに謝意を表する。



## 文献と註

- 1) 文部科学省:「中学校学習指導要領理科編」, 大日本図書, 2008, pp.28-30.
- 2) 戸田盛和他:「新版中学校理科1分野上」, 五版, 大日本図書, 2010, pp.57-59.
- 3) 密度の測定方法には、これ以外に、天秤と比重びん(ピクノメーター)を用いる方法がある。  
この方法は、試料が液体や固体の場合浮力を無視できるので、密度を精密に測定できる点においては優れている。しかし、比重びんの容積が未知の場合には、試料と同体積の基準物質(通常は純水を用いる)の質量と密度が必要となる。加えて、実験操作や密度の算出方法が煩雑であり、中学校理科実験での導入は事実上不可能である。
- 4) 日本化学会編(荻野和子代表):「マイクロスケール化学実験」, 日本化学会, 2003.
- 5) M. M. Singh, R. M. Pike, and Z. Szafran: "Microscale and Selected Macroscale Experiments for General and Advanced General Chemistry," John Wiley & Sons Inc., New York, 1995.
- 6) J. Skinner: "Microscale Chemistry," The Royal Society of Chemistry, London, 1997.
- 7) マイクロスケール化学実験フォーラム(荻野和子代表, 吉野輝男管理):  
<http://science.icu.ac.jp/MCE/> (2011年2月アクセス).
- 8) 京都マイクロスケール実験研究会(芝原寛泰代表・管理):  
<http://natsci.kyokyo-u.ac.jp/~shiba/html-KMSchem/> (2011年2月アクセス).
- 9) The 21<sup>st</sup> International Conference on Chemical Education, Taipei, Taiwan, August 8-13, 2010.  
<http://icce2010.gise.ntnu.edu.tw/> (2011年2月アクセス)
- 10) The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem) 2010, Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2010.  
<http://www.pacifichem.org/> (2011年2月アクセス, 研究発表の要旨を pdf ファイルでダウンロードできる).
- 11) 中川徹夫(研究代表者), 吉國忠亜(研究分担者):「理科を専門としない教員のための水溶液に関する指導資料の開発」, 平成16-17年度科学研究費補助金(基盤研究 C2, 16500539). 研究成果の概要については, 下記の URL を参照.  
<http://kaken.nii.ac.jp/en/p/16500539> (2011年2月アクセス)
- 12) 中川徹夫(研究代表者), 吉國忠亜(研究分担者):「小学校・中学校におけるマイクロスケール実験教材の開発」, 平成18-19年度科学研究費補助金(基盤研究 C, 18500650). 研究成果の概要については, 下記の URL を参照.  
<http://kaken.nii.ac.jp/en/p/18500650> (2011年2月アクセス)
- 13) 中川徹夫(研究代表者), 吉國忠亜(連携研究者):「理科に対する学習意欲を向上させるマイクロスケール実験教材の開発と改良」, 平成20-23年度科学研究費補助金(基盤研究 C, 20500748). 研究成果の概要については, 下記の URL を参照.  
<http://kaken.nii.ac.jp/en/p/20500748> (2011年2月アクセス)
- 14) 中川徹夫:「マイクロスケール実験を導入した高校化学教材の開発」, 日産科学振興財団理科/環境教育助成成果報告書, 2009年12月.  
[http://www.nissan-zaidan.or.jp/membership/2008/05\\_seika/08077.pdf](http://www.nissan-zaidan.or.jp/membership/2008/05_seika/08077.pdf) (2011年2月アクセス, 本報告書の全文を pdf ファイルでダウンロードできる).
- 15) 中川徹夫, 大橋一隆, 若月洋次, 吉國忠亜:「デュマ法によるマイクロスケールモル質量測定実験における浮力の影響」, 神戸女学院大学論集, 56(2), 109-117 (2010).
- 16) 中川徹夫:「2009年度神戸女学院大学で高校生を対象に実施したマイクロスケール実験の授業実践」, 神戸女学院大学論集, 57(1), 133-145 (2010).
- 17) 中川徹夫:「アルカノール-水混合物の体積:密度または過剰体積から算出した計算値とマイクロスケール実験による実測値との比較」神戸女学院大学論集, 57(2), 99-107 (2010).
- 18) T. Nakagawa, "Microscale Experiment on Decrease in Volumes with Forming Binary Liquid Mixtures: Four Alkanol Aqueous Solutions," *Program Book of the 21<sup>st</sup> International Conference on Chemical*

*Education*, Taipei, Taiwan, 2010, p. 79.

- 19) 中川徹夫：「マイクロスケール実験による鉍物の密度測定」，日本地学教育学会第64回全国大会鹿児島大会講演予稿集，**B-20**，142-143 (2010)。
- 20) 中川徹夫：「マイクロスケール実験による金属の密度測定」，日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集，**C9**，34 (2010)。
- 21) G. C. Benson and O. Kiyohara: "Thermodynamics of Aqueous Mixtures of Nonelectrolytes. I. Excess Volumes of Water-n-Alcohol Mixtures at Several Temperatures," *J. Solution Chem.*, **9**(10), 791-804 (1980).
- 22) David R. Lide: "CRC Handbook of Chemistry and Physics," 85<sup>th</sup> Edition, CRC Press, Boca Raton, 2004, p. 6-5.

(原稿受理 2011年2月24日)