

物質質量とモルの指導演案 —考え方と授業実践— の研究

森川 鐵朗*・檜田 豪利**

(平成15年 4月30日受付；平成15年 6月16日受理)

要 旨

前報では、物質質量とモルを学ぶための生徒用「学習シート」を提案した。本論文では、このシートを用いて授業実践をするために、教師用指導演案を研究する。第2節では物質質量指導の考え方を考察し、第3節ではモルの導入法を検討し、第4節では相対質量とモル質量を扱う。第5節では、関連する教育資料にみられる諸解釈を取り上げる。最後に「学習シート」の最初の部分（物質質量の考え方）を板書する仕方の一例を示す。物質質量とモルを物理量として指導するには、物理量の単位独立性や測定原理などを学習済みであることが不可欠である。

KEY WORDS

instruction plan	指導演案	school practice	授業実践
students' sheet	学習シート	write on a blackboard	板書する
amount of substance	物質質量	mole	モル (名称)
a single elementary entity	要素粒子 1 個	physical quantity	物理量
quantity balance	量バランス	science education	科学教育

1. はじめに

化学の教科書や学習者が「モルは (個) 数」のことに誤解している、との指摘¹⁻³⁾は多い。前報⁴⁾では、それらの指摘を教訓にして、物質質量とモルを物理量として学習するための生徒用シートを提案した。このシートでは、物理量学習のよくある順序とは逆に、物理量からその単位へと進む。生徒は、長さや体積などの身近な物理量⁵⁾の場合、扱い方を日常的にも体験しており、単位を使う測定法も心得ている。したがって、生徒は身近な物理量の学習において、単位 (例えば、長さにおけるメートル) から出発してもこなせるであろう。他方、物質質量とモル^{6,7)}は、彼らにとって初めての物理量⁸⁾である。そこで、前報でも強調したように、物質質量そのものを知らないのだから、その単位であるモルから出発しても物質質量を理解することは難しい。

生徒が物理的諸科学で扱う量を物理量として学習するためには、物理量に関わる「比較法」と「量バランス法」を理解⁹⁾していなければならない。しかしながら、現在の科学教科書では長さや体積などの身近な物理量でさえも物理量として十分には教えていない^{10,11)}のだから、物質

* 上越教育大学自然系教育講座 〒943-8512 上越市山屋敷町1；morikawa@juen.ac.jp

** 金沢大学教育学部附属高等学校 〒921-8173 金沢市平和町1-1-15；kashida@ed.kanazawa-u.ac.jp

量を物理量としていきなり扱う指導は無理である。この現状を踏まえて、生徒用シートは作成されている。そこで、本指導案では物理量としての物質量の学習のために、物理量の（単位からの）独立性や物理量の測定原理と表現「物理量 = 数値 × 単位」など¹²⁾も扱った。生徒が長さや体積などを物理量として既習ならば、モルの物理量としての学習もより簡単にすむ。いうまでもないが、指導者自身が教材の考え方と組み立てを深く理解していなければ、よい授業実践はできない。

自然科学や数学では「同一視 identification」という分類法¹³⁾の理解が欠かせない。同一視とは簡単にいえば、複数の対象をある基準で同類とみなすことである。同値関係 equivalence relation による分類は、数学の体系立てられた典型的な同一視である。物理量の次元も同一視によって作成された類⁹⁾のことであった。化学でいう「酸」や「塩基」は、いろいろな化学物質をある共通の性質を基にして同一視された、類のことである。塩酸と水酸化ナトリウム水溶液が、ちょうど中和するならば、それらは同じ量^{8,14)}だ、と化学では考える。前報で述べたように、このとき、異種の要素粒子を「つぶ」のように同一視しているのである。化学の言葉で描けば、要素粒子の記号 HCl や NaOH などを記号(+, →)で結ぶ中和反応式となる。物質量を理解する第一の鍵は、異種の化学物質の要素粒子間でも（「つぶ」のようにみなして）同じ量と考えられるか否か、にある。生徒には、化学反応式の簡潔性と「同量とみなす」ことの巧さとを味わってもらおう。

物質量を理解する第二の鍵が、化学物質（要素粒子の集合体）の量を比べる方法（測定原理）の理解である。化学物質では、要素粒子を一つ一つ数える方法は粒子の数が膨大なので、実際には使えない。物質量の比較方法とは、化学量論式に典型的にみられる「一対一対応^{3,9,15)}」である。ここでの酸と塩基の量を $n(\text{HCl})$ と $n(\text{NaOH})$ と置く。もし、それらがちょうど中和するならば、要素粒子が一対一対応しているので、両者の量を等号で結ぶ。化学反応式が、自然現象として起こる要素粒子間の一対一対応を簡潔に示しているのである。巨視的な量である n のバランス（釣り合い）は結局は、原子・分子の世界で「どの要素粒子でも1個の物質量は同じ⁸⁾」とみなしていることに帰着する。

こうして、物質量学習の入口は二カ所になる。学習シートその1では、化学者が昔から馴染んできた化学の考え方をそのまま採用して、化学反応における「化学物質（の量）の釣り合い」から入る。学習シートその2では、この巨視的な「釣り合い」を突き詰めて「要素粒子1個の量はどれも同じ」とみなす。その1では、量の定義はぼんやりしているけれども、実際に測定できる方法である。その2では個々の要素粒子から出発するので、見通しはよいが概念的で、数理的な処理ですませなければならない。物質量の理解には、いずれも不可欠の方途である。

2. 物質量の考え方と表現法について

生徒は、化学物質の世界の物理量である質量 m や体積 V などを測定し、学習してきた。化学物質は、手に触れ連続体のようにみえるけれども、極微の世界では、原子・分子・イオンなどの粒子でできていると学んできた。物質量 n は、 m や V などと同じく、化学物質の巨視的物理量であるが、極微の世界とをつなぐ量でもある。他方、相対原子質量（原子量）や相対分子質量（分子量）は個々の粒子の数値（後節参照）で、記号 A_r を当てる。授業では、両世界の量の相違を意識して（生徒に教えなくとも区別して）語ることが大切である。

・ある「物質の質量を m と置く」とき、この m は単位（キログラムやグラムなど）に無関係であることに注意しよう。つまり、質量という次元（いろいろな質量の集合）の中のどれかを m と置いたのである。フラスコ中の溶液の「体積を V として」では、単位付きの特定の体積を指示してはいない。「化学物質 B の物質質量を $n(B)$ と書く」ときも同様で、特定（実際）の量を意味しない。このように、どの物理量でも単位に無関係に選ぶという原理（物理量の単位独立性¹²⁾）が使われている。いろいろな物理量で、この原理を練習し学習済みでなくては、物質質量の場合でもそのように扱うのは難しい。

モルは物質質量であり、物質質量は物理量であるので、三者の包含関係はこの順序でより大きくなる。そして、数や counting unit¹⁶⁾ は、この物理量の枠外にある。換言すると、物質質量という次元にはモルが含まれていて、その他に質量や体積などの別の次元もあり、これらの次元を集めると、物理量になり、この物理量の枠外に数（個数）がある。これらの違いを際立てるには、それらの包含関係をベン図で表す¹⁷⁾とよい。生徒には、三者のより大きくなる包含関係「塩酸は酸であり、酸は化学物質である」「うぐいすは鳥であり、鳥は動物である」などを例示するとよい。

化学物質の粒子を扱うとき、まとめたり分けたりして「ひとまとめのかたまり」を考える。そのかたまりを「要素粒子」という。例えば、 H_2O 、 $NaCl$ 、 $2H_2$ 、 $(1/2)O_2$ 、 ^{12}C 、 Na 、 H^+ など、生徒は既に要素粒子を（この術語を知らなくても）学習してきている。要素粒子は、例えばエタノール C_2H_5OH 中の $6H$ のように、実際に一つに結合した粒子でなくてもよい。化学物質の物質質量はその要素粒子を指定して後、定まるので、物質質量学習の第1ステップとして要素粒子は特に大切である。

物質質量の表記では $n(H_2O)$ や $n(2H_2O)$ のように、化学記号を用いて要素粒子を指定¹⁸⁾し、化学物質を特定する。この表記法は化学特有のもので、塩化ナトリウムの結晶が入っている試薬びんに、 $NaCl$ とラベルするようなものである。この試薬びん中の物質質量は、 $n(NaCl)$ と書ける。教科書などにみられる化学特有の言い回し「 $NaCl$ の約 10 g を取り」などにも注意する。一般的に「化学物質 B の物質質量 $n(B)$ は云々」というと、要素粒子の化学記号 B で化学物質の名前を代用している。化学で H_2O というとき、水という化学物質の名称やその要素粒子や分子1個などを指すので、文脈からそれらを区別しなくてはならない。この化学の言い回しは慣れてくると便利なので、本稿でも採用している。

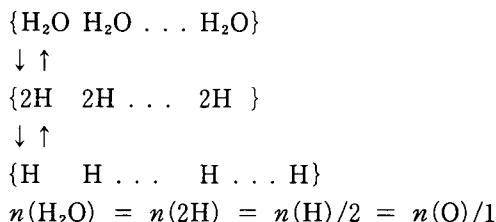
物理量が「物理量 = 数値 × 単位」と表記される所以は、物理量の測定原理を学習しなければ、生徒にはわからないままになる。ある水の質量 $m(H_2O)$ が、天秤の1グラム分銅 18 個分と釣り合ったとすれば、 $m(H_2O) = 18 \text{ g}$ と書く。この例で、水分子二つを一つの要素粒子とみなせば、 $m(2H_2O) = 18 \text{ g}$ となる。当然だが、与えられた化学物質の m と V は、要素粒子をどのように選ぶとも不変である。そこで、 m と V で要素粒子を指定する表記法はみかけないのである。ある化学物質の物質質量を測定するには、基準用の別の物質質量（単位とよぶ）と比較する。では、物質質量の比較の方法（測定原理）とは何か、また「基準の物質質量」はどれか。

前報⁴⁾では、物質質量とは、要素粒子の種類が違ってても、化学物質や化学反応で釣り合う（バランスする、同じとみなす、一対一対応している）量 amount のこととした。この定義は、国内外の文献ではみかけないが、実は化学の法則を自然に取り入れている。ちょうど中和する塩酸 HCl と水酸化ナトリウム $NaOH$ 水溶液の量を $n(HCl)$ と $n(NaOH)$ と置けば、両者は等

しいと化学では考えるのである。アボガドロの法則¹⁹⁾によれば、どのような気体でも、同温同圧同体積ならば「同物質」である。これらの例が示すように、物質量の（釣り合いの）学習は中等化学教育水準では化学法則の理解に連なるのである。

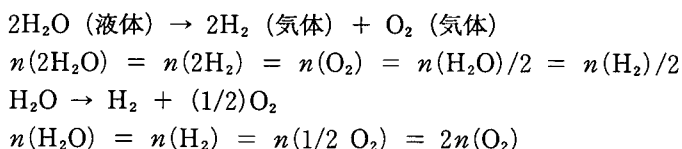
生徒が「要素粒子の種類が違って同じ量」とみなせるように、身近な教具で練習させる。学習シートの「問」では、ボールペンとキャップを例にとりあげているが、その他、コップとスプーン、金属のナットとボルトなど、身近にたくさんある。ダンボール箱が3個あり、順にB, C, BC とラベルが貼ってある。箱BにはボールペンBが、箱CにはキャップCが多量に入っていて、残りの箱BCは空である。BとCとを1個づつ取り出して、キャップ付きボールペンBCをつくり、箱BCに入れる。この操作を繰り返したところ、ちょうど箱Bと箱Cが空になった。ダンボール箱の中の文具の量を、物質量の記号で表してみると、 $n(B) = n(C) = n(BC)$ となる。ここで、BとCとBCとが一対一対応しているのだから、段ボール箱ごとに要素粒子が違っていても、等号で結べる（釣り合う）のである。物質量の比較の方法（測定原理）は、要素粒子間での「一対一対応」であった。生徒は、この対応を、小学生のときから言葉は知らなくても、実は算数（数学）で学習している。例えば、自然数の2は、柿2個と鉛筆2本などを一対一対応させて、つくられた概念である。このとき、一対一対応によって、物体の性質を完全に離れるまで、同一視している。一方、物質量における一対一対応では、要素粒子のもつ結合や配置などを超えても、物理的属性を一部残している。比喻すれば、一対一対応を使って、数学（数、個数）では「点」のように完全に抽象化しているが、物質量では実体のある「つぶ」の性質を描くのである。

化学における要素粒子の一対一対応（測定原理）を、分子式や化学反応式を例に説明する。一対一対応では、ボールペンとキャップの例が示すように、要素粒子を数えない。化学物質1種では要素粒子の複数の集合体とみなし、化学変化では複数種の化学物質間で要素粒子の対応を考える。ある水の量（例えば、18 g）を考えて、要素粒子を次のように板書したとしよう。このような展開図を「粒子シート^{2,3)}」とよぶ。第1行は水の要素粒子を展開していて、他方、水の1分子 H_2O には要素粒子 2H が含まれているので、第2行目のように一対一対応する。このとき、複数の要素粒子をまとめて一つの要素粒子としていることに注意しよう。さらに要素粒子 H で展開すれば、行の長さは2倍になるので、第3行目となる。要素粒子間の一対一対応をみて、最後の「物質量バランス式」を得る。酸素 O も加えた。



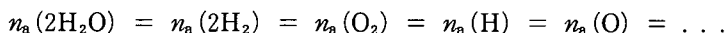
水の分解反応（化学量論式）では、水分子2個から、水素分子2個と酸素分子1個が生まれる。生徒向けには、反応式の各項（ここでは、 $2H_2O$, $2H_2$, O_2 ）を化学量論係数こみで要素粒子とみなし、一対一対応しているのだから物質量を等号で結ぶ、と説明する。物質の「釣り合い」からみて、液体の水 H_2O の量と気体水素 H_2 の量は等しくて、気体酸素 O_2 の量はその半分

と考える。化学量論係数を書き換えても、例えば、 H_2O 、 H_2 、 $(1/2)\text{O}_2$ でも「量バランス式」はすぐに書き下せる。このような要素粒子間の関係を、既習の化学反応で生徒に練習させる。



熱力学的系のサイズは無論、質量でも物質質量でも決定できるが、物質質量には質量では不可能な長所がある。上のいくつかの例にみられるような「物質質量バランス式」には、物質質量の重要な役割がみられる。式の分母には、原子・分子の世界の整数が現れている。つまり、身の回りの化学物質の物理量（物質質量）を通して、原子・分子の世界が垣間みられるのである。この整数性は、質量では読みにくい。物質質量は、微視的（原子・分子）の世界と巨視的（化学物質）の世界とを結ぶ量であることがわかる。「物質質量バランス式」のもう一つの役割は無論、両辺の物質質量の一方を既知とすれば、他方を算出できることにある。

前出の物質質量定義は、「どの要素粒子でも1個では同じ量 amount」とみなしていることに基づいている。そこで、逆に、要素粒子1個の物質質量から出発することもできる。要素粒子は、種類が違えば性質が違うが、「1個では同じ量」とみなして物質質量を定めるのである。要素粒子Bの1個の物質質量を $n_a(\text{B})$ と表す。薄い溶液では凝固点降下度は溶質粒子の濃度に比例する。この法則では、溶質の種類は無関係としている。そこで、二種類の溶液の溶質分子をBとCとすれば、 $n_a(\text{B}) = n_a(\text{C})$ となる。酸塩基が中和するとき、例えば、 HCl と NaOH は種類が違っていても要素粒子一個ずつでは同じ量とみなす。つまり、 $n_a(\text{HCl}) = n_a(\text{NaOH})$ となる。生徒には、 $n_a(\text{B})$ の使い方を化合物や反応式で慣れるように指導する。水の分解反応では、次のようになる。



生徒には、原子・分子・要素粒子の1個から出発したほうが物質質量はわかりやすいか、どうか。長さや質量の実感は、人間のサイズに近い量（巨視的な量）に対して伴うもので、個々の原子・分子のそれらに対してではない。長さや質量という物理量は、原子・分子のサイズでは巨視的な物体の実感を基に、類推することになる。物質質量の場合もそうであろうと、思われる。物質質量は「どの要素粒子についてもその1個の量は同じ」として、それらを集めて巨視的な化学物質の物質質量を導入する方法では、計算とかに頼らざるをえない。

要素粒子Bを x 個集めた化学物質の物質質量を $n(\text{B})$ と書く。すると、物質質量 $n(\text{B})$ は要素粒子の物質質量の総和 $x \times n_a(\text{B})$ に等しい。このように物質質量を導入すると、 m や V や個数のどれとも違うことがはっきりする。ある量の水に対して、二種類の要素粒子 H_2O と $2\text{H}_2\text{O}$ を考える。この水において、要素粒子 H_2O が x 個あれば、 $2\text{H}_2\text{O}$ は $x/2$ 個となる。既述のように、 $n_a(\text{H}_2\text{O})$ と $n_a(2\text{H}_2\text{O})$ とは等しい。そこで、 $n(\text{H}_2\text{O})/2$ と $n(2\text{H}_2\text{O})$ は、前出の水の分解反応でみた「物質質量バランス式」のように、等しい。

質量が物理量だといわれる所以は、重力や慣性を通じて、物理的現象として観察したり体感できることにもある。物理量の特徴の一がこのような物理的実在性である。十分に希薄な溶液

を思い浮かべる。この溶液の凝固点降下度は、溶質粒子の個数に比例する。このとき、溶質粒子が確かに物理的現象を引き起こしている。そこで、溶質粒子のもつ何らかの「量」つまり何らかの物理量がこの現象に関与していると考えるのが自然（現代の科学の流儀、法則の表現）である。しかも、この量は個数に比例するから、示量性である。構成粒子の個数に比例する量として、まず質量が思い浮かぶが、凝固点降下は溶質粒子の質量にも溶質粒子の種類にも無関係である。その他にも、直接的に物質量を比較する（測定する）方法の例示²⁰⁾として、古典的物理学の法則を使うとよい。質量の場合、天秤で比較し測定する。質量の場合と同じように、物質量は、測定方法を定めて測定できる「量」だから、物理量である（前述の「物質質量バランス式」にみられる）と考えておく。生徒には、質量や体積だけではなくて、長さや面積や電流などの物理量の測定例を思い起こさせるとよい。だれでも、質量に物理的実在性を認めているので、キログラムと個数を混同したりしない。物質量でも、物理的実在性を説明することで、モルと（個）数との混同をさける。

最後に、次のようにまとめる。化学物質の物質量は $n(B)$ のように、要素粒子 B（化学記号）を指定して書く。化学物質の物質量を比較（測定）するには、要素粒子間で対応させて考える。どの要素粒子でも 1 個の物質量は同じである。要素粒子 B の x 個の集合体である化学物質の物質量 $n(B)$ は、 $n(B) = x \times n_a(B)$ となる。

3. モルの導入と使い方について

物質量は要素粒子を指定してから定まることを、次のように説明したとする。ある量の水（ H_2O 約 36 g）の物質量を 2 mol とすると、電気分解して生成される気体酸素 O_2 は 1 mol である。一見わかりやすいが、このような単位を使う説明のままでは「物理量の単位独立性」や「物質質量バランス」をあいまいにしてしまう。物質量を単位にとられないで理解できなければ、単位系に独立な化学の法則、例えば $n(HCl) = n(NaOH)$ 、も不十分な理解に終るであろう。そこで、前節までの物質量の説明では、物質量の単位を全く使わなかったのである。

長さや体積などの身近な物理量には、歴史的に地理的にみて、SI 以外にもいろいろな単位があったが、物質量はそうではなかった。つまり、生徒にとって、長さは身近かにあって、日常的にも体験し学べる物理量であり、単位間の換算なども経験しているが、物質量はそういうものではない。歴史的社会的にいろいろと選ばれたインチや寸などでも、物理的にみれば、長さという唯一の次元からの選択であった。物質量の次元には無数の物質量が含まれているわけだから、長さの場合と同じように、無数の単位がありえるのだが、物質量には長さや体積のような歴史がなかったので、モル以外に単位が知られていないのである。

高校生は、長さはどのような量かとは教師に問わない。化学者は、炭素 12 の 1 個の質量が何々 kg と書かれていてもその質量はどのような量（物理量）かとは疑わない。高校生は、机の幅は物差と比較して測定することを知っている。机の幅と物差は長さという同一次元に属していると（暗黙にでも）わかっているから、この比較は可能なのである。化学者は、質量は天秤で測定すると知っているからである。要するに、高校生も化学者も共に次元と測定法がわかっていると、安心して（あるいは、慣れて）いるのである。ところが、物質量の場合は慣れていないので、定義から理解しようとして迷ってしまうのではなからうか。化学を離れた日常生活の中で、物質量が使われることがあるのだろうか。例えば、木片を金属のナットとボルトでと

めて組み立てるとする。ナットとボルトの「量」が同じだけ必要と考えるとき、この量（個数ではない）は物質質量に似ている。単位としてのモルの理解にも、メートルやリットルと同様に、数多くの体験が生徒には必要であろう。

SI の定義では「モルは 0.012 kg（厳密に）の炭素 12 の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量」である。その骨格「モルは・・・系の物質質量」をしっかり押さえることで、生徒の誤解をさける。この定義の「等しい数」を N と置く。科学者が測定したその数は、 6.02×10^{23} （近似値）であった。物理量 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ を N_A と表し、アボガドロ定数とよぶ。物質質量は要素粒子を指定しなくてはならなかった。モルは物質質量であるので、モルの要素粒子は ^{12}C と思いきやそうではない。モルの定義を丁寧に読んでみると、どの要素粒子でも N 個だけ集めれば、その集合体の物質質量が 1 mol となる。そこで、mol の記号には要素粒子の記号をいちいち付けない。つまり、どの化学物質 B の $A_r(\text{B}) \text{ g}$ も 1 mol であり、その要素粒子数は N となる。モルの導入では、アボガドロ定数は不必要であることに注意しよう。

単位としてのモルの使い方でも、要素粒子 1 個から出発できる。まず「要素粒子 1 個ではどの要素粒子でも同じ量」と説明し、炭素 12 の 12 g（厳密に）中の原子数²¹⁾を N と置く。次に、どの要素粒子 B でも N 個集めれば、その化学物質の物質質量が 1 mol となる。要素粒子 1 個の物質質量は、既に測定されている。

$$n_a(\text{B}) = (1 \text{ mol})/N = 1/N_A = (1/6.02 \dots) \times 10^{-23} \text{ mol}$$

このように、実測されている物質質量を生徒に示すとよい。どのような化学物質でも、その要素粒子 1 個の物質質量を求めれば、それはあらゆる化学物質の最小の物質質量となる。ここで、 $1/n_a(\text{B})$ をアボガドロ定数という。この定数の単位は 1/mol なので、生徒が分かりにくいと感じるならば、代りに $n_a(\text{B})$ を授業では採用するとよい。「アボガドロ定数は物理量」と認めながらも「モルは（個）数」とする主張をみかけるが、上の式が示すように、両立場は矛盾し、両立しない。炭素 12 の物質 24.0 g 中の原子の数は N の何倍か、と問えば、2 倍となる。気体水素 H_2 の N 個が過不足なく反応する気体酸素 O_2 の分子数は何個かと問えば、 $N/2$ 個となる。エタノール $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ の分子 $2N$ 個は、何モルかでは、 $n(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2 \text{ mol}$ となる。このような例を練習²²⁾して、慣れることも大切である。

モルの理解はどうしても、記号処理や計算にたよりがちになる。具体的イメージを与えると生徒の理解がすすむこともある。例えば、12 g の炭素 12 の原子を横一列に並べる。以下、この横一列は「メートル尺」に似ていて、「モル尺」とよべる。ある化学物質 B の物質質量をこのモル尺を使って「測定」するには、B の列にモル尺をあてて、一対一対応をみればよい。例えば、分解した水 H_2O がモル尺の 2 倍あれば 2.0 mol であり、1/1000 ならば 1.0 mmol となる。生徒には、簡単な質問でモルの使い方に慣れてさせる。炭素 12 を 24 g 集めると何モルかでは、モル尺の 2 倍なので、答は $n(^{12}\text{C}) = 2.0 \text{ mol}$ となる。水 H_2O が 2.0 mol 分解したとき「水素 H_2 と酸素 O_2 の物質質量は」では、答は $n(\text{H}_2) = 2.0 \text{ mol}$ と $n(\text{O}_2) = 1.0 \text{ mol}$ となる。このとき、2 mol から合計 3 mol 生まれている。生徒はこのあたり（物質質量が増えること）を不思議に思うかもしれないが、物質質量は要素粒子の選び方で変わることを出させるとよい。生徒が一対一対応の使い方に慣れてきたら、モル尺を捨てればよい。生徒へのよくみられる質問で、この物質の「1 mol は何グラムか」「18 g は何モルか」というモルとグラムとの間の換算演習²²⁾は要注意である。生徒が物質質量と質量を混同するきっかけになりがちである

から。

最後に、要素粒子 B からなる化学物質の物質量 $n(B)$ を、モルを用いて測定したとき、 $n(B) = a \text{ mol}$ と書く、とまとめる。

4. 要素粒子の相対質量とモル質量について

原子量や分子量は生徒にはわかりにくいようだ。現行の多くの高校教科書では、次の第2式を基に、 $A_r(B)$ を「炭素原子 ^{12}C の1個の質量を 12 とするときの B の相対質量」などと説明する。IUPAC の導入法²³⁾は第1式で、こちらがわかりやすい。つまり、 $A_r(B)$ とは、質量単位として u (あるいは m_u) を採用し、要素粒子 B の1個の質量 $m_a(B)$ を測定したときの数値のこと、である。ここでは、物理量の測定原理「物理量 = 数値 × 単位」が生徒に十分に理解されている必要がある。実験室で実際に扱う化学物質では、元素の A_r をあてはめる。時々みかける式、 $1 \text{ g} = 1 \text{ mol} \times u$ は左右の辺で次元が合わないので、第3式に換える。この式は、 $12 \text{ g} = N \times m_a(^{12}\text{C})$ から導く。

$$m_a(B) = A_r(B) \times u$$

$$A_r(^{12}\text{C}) = 12 \text{ (厳密に)}$$

$$1 \text{ g} = N \times u$$

上の第2式を基に $A_r(B)$ を導入すると、生徒からはなぜ相対量かと、質問されることがある。SI の基準 kg は、人の体重を表すには便利だけれども、原子・分子1個の質量には遠すぎる。どの物理量でも基準に選んだ単位の近くでは扱いやすいが、その単位から遠ざかるほど扱いにくくなるのである。そこで、化学では次のような工夫をしている。ガソリンを燃焼してどれくらいの熱(正確にはエンタルピー)がでるか、熱力学的温度 $T = 0 \text{ K}$ を基準に選ぶのではなく、標準状態 (25 °C, 1013 hPa など) からのずれで表す。このときは、状態量としての性質を使って加減法ですませる。質量もある量を基準に選びそこからの増減分を選んで表現できるが、質量の自然法則を利用する場合、相対量としての商(あるいは、比)ですむことが多い。質量分析法では、質量スペクトルの横軸をイオンの相対質量(割る電荷)で目盛っていますませる。要素粒子 B と C とにおいて、 $A_r(B)$ と $A_r(C)$ との商は u の選び方に依存しない。つまり、相対質量の枠の中では、スケールに無関係である。

ある化学物質の質量を天秤で測定し、モル質量で割れば、その化学物質の物質量が求められる。そこで、要素粒子を B とすれば、三者の関係式は次の第1式になる。ここでは、まぎれにくくするため、質量の記号にも記号 B を付けている。どの B でも、1 mol 集めれば $A_r(B) \text{ g}$ となり、逆に、 $A_r(B) \text{ g}$ の物質量は 1 mol となる。一般的に、第2式のように書ける。巨視的(熱力学的)な物理量である $M(B)$ を単位 g/mol で測定すれば、要素粒子1個の数値 $A_r(B)$ が得られるのである。ここでも「物理量 = 数値 × 単位」に注意しよう。モル質量と原子量のどちらを生徒に教えるべきかという議論はあまり意味がない。

$$n(B) = m(B)/M(B)$$

$$M(B) = A_r(B) \text{ g/mol}$$

$$M(B)/M(^{12}\text{C}) = m_a(B)/m_a(^{12}\text{C}) = A_r(B)/12$$

示強性物理量であるモル質量も、生徒にはなかなか理解しにくいようだ。硬貨を数える銭枮（ぜにます）や卵パッケージなどを使い、モル質量を説明するとよい。銭枮の実物は博物館にあるし、写真ならばインターネットなどでも容易にみられる。銭枮では、枮目ごとに硬貨が1枚だけ入る。そのような枮目ごとに、硬貨の代りに、炭素 12 の原子を1個入れるとする。炭素 12 の 12 g がきっちり入る大きさの枮を、仮に「モル枮」とよぶ。枮目の総数は N となる。このときの質量 $m(^{12}\text{C})$ は 12 g で $N \times m_a(^{12}\text{C})$ に等しい。このときの物質質量 $n(^{12}\text{C})$ は 1 mol となり $N \times n_a(^{12}\text{C})$ に等しい。このモル枮の商（質量 ÷ 物質質量）を $M(^{12}\text{C})$ と置くと、12 g/mol と $m_a(^{12}\text{C})/n_a(^{12}\text{C})$ とに等しい。このモル枮を使い化学物質 B を測り、 x 杯あったとする。総質量 $m(\text{B})$ は $x \times N \times m_a(\text{B})$ で、総物質質量 $n(\text{B})$ は $x \times N \times n_a(\text{B})$ となる。両者の商 $m(\text{B})/n(\text{B})$ は $m_a(\text{B})/n_a(\text{B})$ に等しくて、何杯でも変わらない。 $M(\text{B})$ は N に無関係である、とわかる。枮目ごとに2個の B を入れれば、 m_a が2倍になるが n_a は変わらない（要素粒子1個の物質質量はどれも同じな）ので、 $M(2\text{B}) = 2M(\text{B})$ となる。さらに、 $M(\text{B})$ と $M(^{12}\text{C})$ の商を求めると、上の第3式の第1の等号が成立する。ここで分母分子を u で割り、 $A_r(^{12}\text{C}) = 12$ を思い出せば、第2の等号が成立する。さらに、SI のモルの定義が示唆する関係式、 $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$ を使えば、第2式を得る。

次のように、まとめる。物質質量の測定で要素粒子間の対応を実際に使うのは面倒なので、質量 $m(\text{B})$ だけを測定して、 $n(\text{B}) = m(\text{B})/M(\text{B})$ と換算する。高校化学では、 $A_r(\text{B})$ あるいは $A_r(\text{B}) \text{ g/mol}$ を既知とする。

5. モルの解釈をめぐって

物質質量とモルをめぐって日本の教育資料にみられるさまざまな解釈は、生徒の理解にも反映している。この節ではそれらの解釈を検討し、物質質量とモルの授業実践に役立てることにする。

SI では、日本語のカタカナを単位記号として認めていない、そこで「モル」という用語は意味不明となり、1 mol と書くべきである、との主張がある。モルは常に 1 mol と書くべきなのだろうか？ SI の公式翻訳文⁹⁾では「モルは・・・系の物質質量であり、単位の記号は mol」となっている。ここで「1 mol は云々」ではなくて「モルは云々」と定められていることに注意しよう。該当箇所の英文は「The mole is ...」であり、「1 mol is ...」ではない。術語の「モル」は単位記号ではなくて、名称(英語の mole の訳語)である。上の和訳公文書 p. 20 はモルの定義を述べており、その上の数行に「・・・「物質質量」という量の単位にモル(記号 mol)という名称が与えられた・・・」とある。中国語では、モルを「摩爾 (mo er)」と音訳⁹⁾している。つまり、単位の名称は言語によって異なってもよいが、記号 mol はそのまま使うべきものなのである。

日本化学会の出版物などで、推奨される単位のリストの上部に、フレーズ「物理量は数値と単位との積」をよくみかける。そこで「モルは云々」という文は正しくは「1 mol は云々」と、数値と単位との積で書くべきだ、との主張もある。この主張ではフレーズを、数値を含まない単位(記号だけの表現)は物理量ではないと解釈して、「mol は物理量ではなくて」「1 mol として物理量となる」と主張しているのかもしれない。厳密に言えば、このフレーズは、SI が決めているのではなくて、SI の背景にある考え方である。物理量の測定とは、測定したい物理量をその物理量と同種の物理量つまり単位と比較して何倍か(数値)を求める作業である。「物理

量は数値と単位との積」は物理量の測定の原理¹²⁾を表わしているのである。ある物質の物質質量 n を mol を単位にして測定して、数値として a が得られたとすれば、 $n/\text{mol} = a$ すなわち $n = a \text{ mol}$ と書くのであって、 n と 1 mol とを比較するのではないのである。「1 mol」がこの原理に基づいている表現とすれば、この表現¹⁰⁾は、ある物質質量を測定したら 1 mol であった、ということになる。単位の記号である mol は、SI で定めた物質質量そのものを指示する記号なのである。そこで「1 mol という記号は、数学で x を $1 x$ とするのと同じ」という説明も間違いとなる。SI の単位の記号 kg や mol などは、定義されている物理量そのものを指していることに注意しよう。「単位は物理量」の意味を、もう少し詳しく述べる。

キログラム原器の質量が 1 kg と定義されているかのような説明もよくみかけるが、これも誤りである。上述の公式翻訳文の該当箇所をみればわかるように、カタカナで「キログラムは云々」となっている。SI は原器そのものの質量を kg とよぶことにしているのであって、原器の質量を 1 kg と定めてはいない。定義、kg か 1 kg か、の背景には、測定原理「物理量は数値と単位との積」の意識の有無がうかがえる。キログラムの制定は古い (1901) ののであいまいな点があるが、新しいケルビンを見ると、さらにはっきり²⁴⁾とする。SI の歴史とその前史を振り返ればわかるように、「単位は物理量」となった基本単位は、ケルビンが最後で、1967年 (第13回国際度量衡総会) であった。ケルビンは水の三重点の熱力学的温度の 273.16 分の 1 とする、と定められた。水の三重点を T_3 として式で書くと、 $T_3/273.16 = \text{K}$ 、すなわち、 $T_3 = 273.16 \text{ K}$ 、となる。定義はこれだけで、ケルビンは物理量であるとは、SI のどこにも書かれていない。でも、水の三重点は物理量なのだから、K そのものが (単なる単位記号ではなくて) 温度という物理量であることは明らかであろう。すると、セルシウス度 $^{\circ}\text{C}$ も、ケルビンとの関係式⁹⁾から、物理量となった。そこで、 25°C という $^{\circ}\text{C}$ という物理量が 25 倍の意味になる。要するに、SI では単位 (の記号) そのものが、物理量を指しているのである。

典型的なモルの解釈では「モルは原子や分子の個数を表す (ダースのような) 単位」と説明する。そして、高校教科書では大勢として「モルは個数」と教えて²⁵⁾いる。古くは、1977年に McGlashan¹⁶⁾が「SI のモルは数ではなくて、counting unit でもない」「物質質量は物理量である」と強調している。すなわち、対立する文脈は「モルは個数」か「モルは物理量」かである。ダースは counting unit といって、数そのものである。荷物二個とか車三台とかの「個」や「台」は、助数詞²⁶⁾という。SI の背景²³⁾には、どの物理量も固有の次元に属している、との考え方があり、いろいろな次元を分解すると、結局は七種の基本単位があれば充分だ、としている。「モルは個数」という解釈には、物質質量の物理量としての次元の意識がないようだ。

数 (実数) や counting unit (も含めて広く) は物理量である、という主張もみかける。単位記号のついていない「数」であっても、物理量として同等に扱う²⁵⁾というのである。ごく普通の考え方では、数や counting unit を単独では物理量の仲間に入れない。ただ、数を無次元量として扱う方法は知られているが、化学の例にみる原子量・分子量や比重など、同種の物理量の商では要注意かもしれない。これらの例は、単位が付かなくても単なる数ではなくて、物理量の測定原理である「物理量 = 数値 \times 単位」における数値のこと⁴⁾であった。「モルは個数」はこの測定原理からみると、物理量と数値とを混同しているようだ。

6. 授業実践のための板書について

物質量とモルの授業で「学習シート」をそのまま読み上げるようにはしない。読んで自習する仕方と聞きながら学習する授業とは大いに異なるからである。板書の仕方は昔からいろいろと工夫されてきた。ここでは、日米の著書^{28,29)}を手本にして「2 物質量の考え方と表現法」を具体例として、その骨子を考えてみる。

横書の板書では一般的には、左から右に向かって書いていく。黒板の左端あるいは中央を全体の要約分の第1区画として、要素粒子 B、物質量 $n(B)$ と一対一対応、物質量の釣り合い、とを3行に分けて上下に並べる。つまり、黒板全体を、要約、それらの3行分ごとの説明、合計4区画に分割する。その日の1時限分授業全体の要となる用語を書き記す（その日の授業の最後まで消さない部分）と共に対応する説明部分を分けて、授業全体の構造化をはかるのである。黒板に書き込みすぎると、生徒の注意が散漫になるので、空白部分を十分にとる。「今日の授業の要点はこれら三つです」と、授業を始める。

板書時には書いている文字の前に立ちふさがらないように、書く場所の右端(右利きのとき)に立ち、その左側に書く。左端黒板の前では、生徒には書き手の右側から文字が読めるように立つのもよい。このとき授業者にとって大切な留意点は、聞き手とのリンクを断ち切らないように(背中に聞き手を常に意識して、頻繁に脇によけるとか、声をだしながらとか)していることである。

生徒には記号とそれらの意味、さらに、板書時の約束を前もって注意しておく。さらに、初出時には、再度確認しながら板書を進める。国際規約では、物理量の記号としてイタリック体(斜体)を、単位はローマン体(立体)を使うが、手書きの板書では両者を区別しにくい。そこで、イタリック体の板書では ISO(国際標準化機構)の推奨を採用して、記号に下線を引くとよい。日本語文字のサイズは大きめ B6 程度以上で、活字体で丁寧に書く。色チョークによる記号は意外に読みにくい。

黒板の第2区画の上端に『化学物質の要素粒子 B の説明』と板書する。まず、生徒には、この言葉を聞いたことがなくても実はよく知っている、今までに学習してきた沢山の事例、化学物質とその要素粒子、を思い起こさせる。水の入ったビーカーを図示(断面図でよい)し、水を起点に矢印を引き出し、その先に H_2O や $2H_2O$ や $3H_2O$ などを描く。口頭でも「 H_2O や $2H_2O$ や $3H_2O$ などは化学物質である水(ひと呼吸おく)の要素粒子」と説明する。空気の入った栓付きフラスコを描き、空気を起点に矢印を引き出し「この空気は混合物だが、その要素粒子は何か」と問いかける。回答を待ってから、矢印の先に酸素分子や窒素分子の分子式を描く。ラベル付き試薬びん(例えば、結晶水を含む硫酸銅)を掲げてみせて、「この試薬では要素粒子を何々と考えている」とその化学式を描く。ここで『要素粒子 B の説明』の下に『化学記号で指定する』と書き加える。さらに、化学物質と要素粒子の他の例を生徒に列挙してもらおう。板書の結果を指示しながら「化学物質の要素粒子は、化学記号で指定する」とまとめる。

黒板の第3区画の上端に『物質量 $n(B)$ と $n_a(B)$ 』と、改行して『要素粒子間の一対一対応』と板書する。まず、ダンボール箱3個を例に、学習シートの操作を繰り返す。ここで、B と C と BC とが一対一対応しているので、要素粒子が違っていても、等号で結べる(釣り合う)ことに気付かせる。ダンボール箱の文具の量を、物質量の記号で表してみると、 $n(B) = n(C)$

= $n(\text{BC})$ となる。このとき「どの要素粒子も 1 個では同じ量」つまり「 $n_a(\text{B}) = n_a(\text{C}) = n_a(\text{BC})$ 」とみなしている。隣の第 2 区画の原子・分子を指示しながら、物質質量では「どの要素粒子でも 1 個では同じ量というわけ」と説明する。「同じ量」の「量」を、数（個数）と混同しないように、特に注意を払う。

黒板の第 4 区画の上端に『物質質量の釣り合いの説明』と、改行して『中和するとき $n(\text{HCl}) = n(\text{NaOH})$ 』と板書する。「釣り合い balance とは、等号で結ぶこと」である。まず、塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の要素粒子を確認する。「中和するときは、量は同じ」だから、釣り合っていると説明する。反応式を $\text{HCl} + \text{NaOH} \dots$ と描いて、要素粒子 1 個ではどれも量は同じ $n_a(\text{HCl}) = n_a(\text{NaOH})$ なので、要素粒子が溶液中に何個あっても、これらの酸塩基は同じ量、と説明してもよい。教具として、 HCl あるいは NaOH と書いた磁石を複数用意する。これら 2 種類の磁石を黒板上で一対一対応させて並べる。磁石 HCl と磁石 NaOH の一組の対応では、 $n_a(\text{HCl}) = n_a(\text{NaOH})$ と書ける。磁石間の対応が複数組の量バランスは、 $n(\text{HCl}) = n(\text{NaOH})$ となると、説明する。水の分解反応では、『 $n(\text{H}_2\text{O})/2 = n(\text{H}_2)/2 = n(\text{O}_2)$ 』を板書する。このように生徒には、既習の事例を時間の許す限り思い起こさせる。「物質質量を等号で結ぶ関係式は、化学の法則を表す」とまとめる。

註 と 文 献

- 1) J. R. Staver and A. T. Lumpe, "Two Investigations of Students' Understanding of the Mole Concept and its Use in Problem Solving," *Journal of Research in Science Teaching*, 32(2), 177-193 (1995) など。
- 2) 粒子シートやモルに関わる英語圏の議論には、T. Morikawa and B. T. Newbold, "A Tool for Teaching Amount of Substance as a Physical Quantity," *KHIMIYA*, 8(5-6), 285-290 (1999) を参照する。
- 3) 日本語教科書にみられるモルの誤解、単位のモルは物理量であること、一対一対応、粒子シートの提案などについては、森川鉄朗・西山保子『上越教育大学研究紀要』16(2), 651-659 (1997) を参照のこと。
- 4) 本稿は物質質量とモルに関わる授業研究の続報で、前報は、森川鉄朗・樫田豪利『上越教育大学研究紀要』22(2), 637-651 (2003) である。学習シートや物理量としての物質質量と関連する引用文献、要素粒子 1 個の物質質量を基にする物質質量の新しい定義、などはこの前報を参照する。
- 5) 各種の物理量と次元などについては、森川鉄朗・西山保子『上越教育大学研究紀要』16(1), 279-288 (1996) で論じた。物理学の教科書にみられる次元の説明では、次元間の乗除の意味がややわかりにくい。そこで、この論文では、物理量の同値類を物理量の次元とみ立てて、それらの同値類から代表 representative を選び、代表を乗除する方法を次元の乗除法として採用した。離散例の分類法、C. L. Liu, *Elements of Discrete Mathematics*, McGraw-Hill, New York, Second Ed., 1985 を基に類推してもよい。
- 6) 和訳科学用語「物質質量」「モル」「要素粒子」や国際単位系の翻訳文などの典拠は、工業技術院計量研究所訳・監修『国際単位系(SI)：グローバル化社会の共通ルール』国際文書第 7 版日本語版、1998/日本規格協会1999である。
- 7) 用語「物質質量」は、よくみかける説明句「物質の量」の意味ではなくて、まとまった一つ

の概念を表す。日本語では語（英語の word で、character ではない）と語の間の関連において、「の」を含む場合は一般的には、結合が弱くて、概念形成が始まったばかりのときに使われる。そこで、「物質の量」では、概念が熟していない段階であり、学術用語ではない一般的な合成語の使い方、といえる。このようなとき、国語学では「合成語の熟合度とか強度」を考える、とのこと。中国語では“amount of substance”は「物質の量 (wu zhi de liang)」と翻訳されている。この「的」は中国語の文法からいうと、日本語の格助詞「の」に近い。しかし、「物質の量」は、「物質の量」の意味ではなく、基本的な物理量の一つである固有名詞として使われていて、この点は、中国の教科書で特に強調されているようだ。なぜ、「物質」ではなく、「物質の量」と翻訳されているであろうか。考えられる理由のひとつは、中国語で「物質」とすると、「物 (wu)」と「質量 (zhi liang)」との2つの単語と読み取られ、物の質量と誤解されることを避けるためと思われる。この心配は、日本語ではないものと、思われる。中国語では“physical quantity”を「物理的の量」と翻訳しなくても、「物理量」でその意味は伝わっているようだ。つまり、語と語の連結（の「熟合度」）が重要ということであろう。黎 子椰・森川鉄朗「物理化学用語にみる中国語と日本語との相違について」(『化学教育ジャーナル (CEJ, ISSN 1344-7963)』2(2), 通巻3号, 採録番号2-23, 1998) <http://www.juen.ac.jp/scien/cssj/cejrn.html> による。

- 8) 「要素粒子 B の 1 個の物質の量」や「どの要素粒子でも 1 個の量 (amount) は同じ」などは、国内外文献ではほとんどみかけないが、森川鉄朗『化学と教育』51(2), 142-143 (2003) と註4) の前報とで論じた。物質の量は生徒にとって初めての物理量なので、この説明文のように、モル (単位) を使わないで明確に説くことも必要であろう。表現「amount of substance' of a single elementary entity」が英語文献にみあたらない (of a single of) のは、英語として奇妙な感覚を受けるからかもしれない。
- 9) 要素粒子が B である化学物質の物質の量に対する一般式 $n(y \times B) = n(B)/y$ の特例は、註27) の文献にみられる。この式の解釈「物質の量は要素粒子をまとめればより小さくなる」は、前註8) 論文と森川鉄朗・田口 哲『上越教育大学研究紀要』20(2), 535-548(2001) とを参照のこと。その他、物質の比較法や類、量バランス、モルの次元の構成法、物質の測定に関わる古典的物理化学の法則、などもこの紀要論文を参照のこと。
- 10) 中等教科書の物理量の表現や記号や「単位は物理量」などに係る問題点は、森川鉄朗・室谷利夫『上越教育大学研究紀要』19(1), 67-81 (1999) で論じてある。
- 11) 教科書で使う「量の記号列」の意味と働きについては、森川鉄朗『東書メール』東書 E ネット第24号, 東京書籍2002, <http://ten.tokyo-shoseki.co.jp/downloadfr/jrd32687.htm> を参照のこと。
- 12) 単位からの独立性や測定原理「物理量 = 数値 × 単位」などは、森川鉄朗・伊藤真人『化学と教育』49(8), 523-524 (2001) で論じた。
- 13) 化学における典型的な同一視は化学物質概念を例にとり, T. Morikawa and B. T. Newbold, “Step-by-Step Identification for Teaching the Concept of Chemical Substance,” *KHIMIYA*, 10(6), 383-388 (2001) で論じた。ヘルマン・ワイル, 菅原正夫・下村寅太郎・森 繁雄訳『数学と自然科学の哲学』岩波書店, 1959, 付録 B, p. 271 では「等しい (=同類である) という事と同一であるということとを識別する」とある。
- 14) 化学翻訳では、異なる英単語に一つの漢字「量」をあてはめてきた。原子量・分子量・式量では weight のことで、物理量では quantity のことで、物質の量では amount のことである。第1の weight は、IUPAC (以下の註23) では「相対原子質量」や「相対分子質量」

- などで、mass に替っていて、もし「要素粒子」にそのまま当てはめると「相対要素粒子質量」となる。イギリスの教科書などでは relative formula mass とみえるので、これを直訳すると「相対化学式質量」となり、簡略化すれば「相対式質量」となる。「モル濃度」を物理量として（単位からの独立性を）考えれば「物質濃度」に替えることになる。密度で例えると、リットル密度はやめようというようなものである。すると「モル質量」も槍玉にあがるが「物質質量」では、なじみにくい。化学の学術用語はこれからも変遷しそうである。なお、授業での「量」の曖昧さについては、広瀬庄一・森川鉄朗『化学と教育』48(11), 752-755 (2000) も参照のこと。
- 15) 一対一対応の役割やモルの次元や amount balance は註9) 紀要論文の他に、T. Morikawa and B. T. Newbold, "One-to-one Comparison for the Teaching of Amount Balance and the Dimension of the Mole," *Australian Journal of Education in Chemistry*, 59, 17-19 (2002) も参照のこと。
 - 16) 英語圏でのモルと counting unit や number counting unit との関連の議論は、R. G. Forbes, ". . . and Interpreting It," *Education in Chemistry*, 14, 124 (1977); M. L. McGlashan, "The Mole," *ibid.*, 14, 189 (1977); M. L. McGlashan, "Amount of Substance and the Mole," *Physics Education*, 12(5), 276-278 (1977); J. J. MacDonald, "The Mole: How Should It be Taught?," *School Science Review*, 65, 486-497 (1984) などを参照のこと。
 - 17) ベン図の利用例は、T. Morikawa and B. T. Newbold, "Inclusion-Exclusion Diagrams for Teaching Properties of Physical Quantities," *CHEM NZ*, 77, 21-23 (1999) にある。
 - 18) 要素粒子の指定に関する議論は、註9) に加えて、T. Morikawa and B. T. Newbold, "Teaching Specification of Elementary Entities in Amount of Substance and the Mole," *KHIMIYA*, 12(2), 107-110 (2003) を参照する。前報(註4) では要素粒子を「特定」してと述べたが、本稿では「指定」に改めた。
 - 19) ここでのアボガドロの法則(原理)の表現は、日本の化学教科書にみられる「分子数は同数」を「同物質」と置き換えている。この法則には、別のいくつかの表現がある。イギリスの化学教科書、例えば、C. P. Lawrence, A. Rodger and R. G. Compton, *Foundations of Physical Chemistry*, Oxford University Press, 1996 や P. W. Atkins, *Physical Chemistry*, Oxford University Press, Oxford, Sixth Ed., 1998 では「気体は温度と圧力が一定ならば、 $V/n = \text{一定}$ 」を使う。ここらあたりにも、日本では「モルは個数」が、イギリスでは「モルは物理量」が受け入れられる下地の違いがあるのかもしれない。
 - 20) M. L. McGlashan, "Amount of Substance and the Mole," *Metrologia*, 31, 447-455 (1994/95) による。
 - 21) 朽津耕三「単位」『忘れていませんか? 化学の基礎の基礎』別冊化学11月号, 15-19 (1994) にはアボガドロ数は「国際文書に現れない」とある。なお、アボガドロ数が整数か否かの議論は、M. J. ten Hoor, "Avogadro's Number: A Constant Integer?," *Chem NZ*, 84, 15-18 (2001) をみる。
 - 22) 物質質量とモルに係る化学計算は、森川鐵朗・一色健司『上越教育大学研究紀要』21(1), 343-358 (2001) で論じた。
 - 23) I. Mills, T. Cvitaš, K. Homann, N. Kallay and K. Kuchitsu, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, Blackwell Scientific Pub., Oxford, Second Ed., 1993 とその第1版の和訳は、日本化学会標準化専門委員会監修、朽津耕三訳『物理化学で用いら

れる量・単位・記号】講談社 1991 をみる。本稿における記号 A_r などの出典。

- 24) 物理量としての温度とその単位は、森川鉄朗・田口 哲『上越教育大学研究紀要』18(1), 285-299 (1998) で議論した。
- 25) 「モルは個数」であると (SI とは異なる) 日本独自の解釈をする文献はかなり多い。しかし、その主張の(個人の感想ではない)根拠の記述は少ない。組織的な説明例は、青野 修「物質質量 = 個数」『物理教育』25(1), 54-55 (1977) と同氏『次元と次元解析』共立出版 (1982) にある。後者の論法 (p. 97) の問題点は、上述の註 8) 引用文献と読み比べると、よくわかる。系の物質質量は要素粒子の数に比例する。ここで「個数に比例する」としては、論点先取になってしまう。その数を x とすると、式 (4.23) は本稿の記号では、 $x = N_A \times n$ と書ける。式 (4.24) はモルの定義から、 $N_A = N/\text{mol}$ となる。氏の論法ではこの式の N を $N \times \text{コ}$ に入れ替えて、式 (4.25) $N_A = N \times \text{コ}/\text{mol}$ を得る。続けて、 $1 \text{ mol} = N \times \text{コ}$ だからとして、 $N_A = 1$ が導かれて、結局、式 (4.23) は $x = n$ となり「物質質量と個数とは同じ量である」という。上述のように、出発点の論点先取の虚偽をさけて、そのままどれば「物質質量は数」となってしまう。また「コ」を入れ替えるところでは、同じ式を二度使うのだから、 $N_A = 1$ となるのは当然である。

註 3) と註 9) での引用高校教科書の他に、最近の平成15年度用高校化学教科書【化学 I】7社の 001-012 でも、本文中の文脈はいずれも「モルは(個)数」のことで説明する。しかも、002-004, 006-008, 010, 011 の資料・付録では「物理量」の表中に「物質質量」を掲載している。つまり、この「モルは個数」は、個数を物理量(以下の註26参照)であると解釈しているのだろうか。

以下の文献(註27)の p.1 には「われわれが測定できる、すなわち数えることができる唯一の物理量は、びんの中にあるビーズ玉の数とか干渉実験における干渉縞の数のように数を表わす物理量だけである」とある。しかし、これを「数も物理量」の根拠とするのは、誤読である。

「モルは個数」で何故よくないのか、という疑問も聞く。個数で計算して、その数値に記号 mol を添付すれば、「モルは物理量」として計算した結果の式と全く同じになるからであろうか。物質の質量 m が(天秤で)グラム分銅3個と釣り合ったとしよう。この測定者は無論「物質の質量が3個」だとはいわないであろう。が、 $m = 3 \text{ g}$ と書く測定者は、分銅を数えて記号 g を単純に添付した(個の代りに記号 g を置いた)のではなくて、背景に物理量としての質量(概念)と測定法を心得ているはずである。

- 26) 二村隆夫監修『丸善 単位の辞典』丸善2002によれば、土木関係の単位「個」は毎秒1立方尺の流水量のこと。この「個」は明らかに物理量である。また「個」は「特定の助数詞をもたないものを数えるのに用いる」とも説明されている。「単位とは(中山 貫)」には「(単位) アンペアや秒もそれぞれ量そのもの」とある。
- 27) M. L. McGlashan, 関 集三・徂徠道夫共訳『SI 単位と物理・化学量』化学同人, 1974, の第1章の p. 15 の脚注には $n(1/2 \text{ Cu}) = 2n(\text{Cu})$ がみえる。第1.5節には、物質質量を「すべての化学者が十分に理解しているとは限らない」とある。
- 28) 岸 恒男『眠くさせない講義法』日本経営者団体連盟広報部1994, 第3章など。
- 29) S. G. クランツ, 蓮井 敏訳『大学授業の心得』玉川大学出版部1998, 第2章など。

Instruction Plan for Teaching 'Amount of Substance' and the Mole - Realization and School Practice

Tetsuo MORIKAWA* and Hidetoshi KASHIDA**

(Received April 30, 2003; accepted June 16, 2003)

ABSTRACT

A previous paper (Vol. 22, No. 2, 2003) proposed a new set of students' sheets for learning 'amount of substance' and the mole. This paper deals with an instruction plan for teachers who adopt the set in school practice. The second segment describes a method of teaching 'amount of substance'; how to introduce the mole is shown in the third segment; the topics in the fourth segment are relative atomic mass and molar mass; the fifth segment analyzes some interpretations of the mole appearing in teaching materials; and in the last segment an example of how to write part of the sheets on a blackboard is presented. A class of students who have mastered some principles such as unit-independence and measurement of physical quantities is indispensable for instruction plans that lead to 'amount of substance' and the mole.

Bulletin of Joetsu University of Education (ISSN 0915-8162), Vol. 23, No. 1, pp.245-260 (2003)

* Department of Chemistry, Joetsu University of Education, Joetsu 943-8512, Japan

** Senior High School Associated with the Faculty of Education, Kanazawa University, Kanazawa 921-8173, Japan