

物理量としての単位モルの導入法について

森 川 鉄 朗*・西 山 保 子*

(平成8年10月8日受理)

要 旨

現行の高等学校教科書や最近の教育誌では、物質量の単位モルを個数としてあつかうとか、アボガドロ定数(測定値にすぎない)に相当する原子や分子の集団を1モルの物質量と定義している。これらは、国際単位系(SI)からみると、混乱あるいは誤解と思われる。そこで、本稿ではSIを肯定する立場で、物質量という物理量やその単位であるモルを、さらに、モルを用いる物質量の測定法などを考察し、問題点を明らかにする。それらの結果をもとに、科学教育におけるモルの新しい導入法を提案する。この導入法の特徴は、単位(モル)は基準として選ばれた物理量であるとし、さらに、物質量測定法の原理は異種の要素粒子間の一対一対応にあるとして、いろいろな物質の縦横展開図を用いる点にある。

KEY WORDS

amount of substance	物質量	mole	モル(単位の名称)
physical quantity	物理量	elementary entity	要素粒子
molar mass	モル質量	relative mass	相対質量
sheet of substance	物質展開図	SI	国際単位系
one-to-one correspondence	一対一対応	science education	科学教育

1. 序 論

最近の教育誌¹⁻³⁾や現行の高等学校教科書⁴⁻⁵⁾でモルに注目すると、いくつかの点が気になる。その一は、モルはどのような単位かに関してで、“モルは数を表す単位”とか、“物質量が個数の単位”とか、“分子あるいは原子を 6.02×10^{23} 個集めた量を1モルという”とか、“物質量(mol) = 粒子の個数(下線) 6.02×10^{23} (個/mol)”とか述べられている点である。その二は、モルの導入の仕方についてである。高等学校教科書で広く採用されている導入法⁵⁾では、まずアボガドロ定数を提示して、それに相当する原子や分子の集団を1モルと定義していく。そこで、生徒がモルにつまずく原因(のひとつ)は、アボガドロ定数の大きさを感覚的につかめないためとして、それを越えるような実験を工夫¹⁾することになる。

第一の点は、物質量を独立な次元とみなす国際単位系(SI)⁶⁾からみると、あきらかに混乱あるいは誤解のように思われる。物質量の基本単位として個を採用しモルを廃止するべきとの意

* 自然系教育講座

見⁷⁾もあるが、本稿では、SI を肯定する立場から、科学教育における単位としてのモルを論じる。上記の混乱を除くために、物理量である物質質量とその単位を、改めて考察する。第二の点は、物質質量測定法の原理を検討してから、論議すればよいと思われる。測定法の原理——同一次元をもつ物理量の比較の仕方——によって、単位の役割が明確にされ、単位導入の仕方のヒントも得られる、と期待できるからである。この道筋は、実験や観察を通じて自然科学を理解する、という考え方に沿うものであるし、何よりも、測定法の原理は物理量をあつかう教育の基本だからである。測定のための前提やモルに関連する物理量をも考慮すれば、モル導入法の骨格は、おのずからみえてくるであろう。

2. 物質質量という物理量について

本稿では、物理量とは、なんらかの測定方法を定めて、その方法で得られる実在世界の量のことだと考える。自然界の対象物において、物理量は数多く考えられるのだが、広く適用できる物理量が役に立つ。本稿であつかう物質とは、化学物質とか電子の集合体とかであり、その要素粒子⁸⁾とは、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子またはそれらの組み合わせであり、以下の例では、 ^{12}C 、 O_2 、 Ag^+ などをさす。物質は、形を捨象したものなので、物体のもつ多くの物理量が使えない。このような物質に適用できて、しかも物質の量 (amount) に強く関係する物理量は無数、質量である。物質が一種では、質量が2倍になれば、物質の量は2倍になり、その逆も真である。ところが、物質がAとBと二種あるときは、Aの質量がBの質量の2倍あるとしても、科学者の感覚としては、物質の量はAがBの2倍とはならない。例えば、水素元素と酸素元素は、質量の比では(ほぼ)1対8の割合で化合して水となる。水の分子式は H_2O なので、この例の1対8を、物質の量の比では2対1と、科学者は考えている。この例のように、質量とは異なる物質の量が、科学者により測定されていて、それは確かに物理量である。

次元とは、物理量(複数)を比較することで、類別された同値類のこと⁹⁾である。前述のように、質量と物質の量とは、同種の物質では区別できないが、異種の物質間では異なる。物質Aと別の物質Bとを比較して、物質の量の次元をさがすことになる。比較の最も基本的な方法は、数(すう)における一対一対応⁹⁾であろう。生徒は、言葉こそ教えられていないが、一対一対応という概念を小学生のときから学習している。自然数は、例えば、みかん2個、犬2匹などを一対一対応させて、2を抽出し、同様に1, 3, 4などを抽出し、それらを集めたものとされる。物質Aと物質Bとで、要素粒子間の一対一対応をさせる。さらに、物質Cでは、物質Aまたは物質Bのいずれかの要素粒子と一対一対応させる。このような操作を物質D, Eなどに繰り返す。こうして、複数種の物質に対して、物質の量が決定する。故に、以上の操作で定められる物質の量は、同一の次元をもつと考えてよい。この異種の要素粒子間の一対一対応により定まる物質の量は、後節の化学的測定法にもみられるように、科学者の感覚によく合う。まとめると、物質の要素粒子間の一対一対応で定まる物理量が、物質質量 (amount of substance) とよばれるのである。

上の議論が示すように、物質質量を定めるには、物質の要素粒子の種類を指定しなければならない。物質質量の一対一対応で注意すべき点は、高等学校教科書では要素粒子の数を媒介させているがそうではなくて、異種の要素粒子間の対応であることと、関係する要素粒子数がアボガ

ドロ定数程度で、有限だが膨大なこととである。要素粒子数が有限なので、一対一対応で物質量が決定するのである。要素粒子数が膨大な点は、以下でさらに検討する。

ある物質の要素粒子群と自然数とを一対一対応させてみよう。これは、要素粒子を数えることにほかならない。つまり、要素粒子の種類と個数を与えても、物質量は定まる。そこで、高等学校教科書のように、ある数 N (例えば、 6.02×10^{23}) を確定しておいて、要素粒子数が N 個のときの物質量をモルとよぶ、と仮定してみよう。このモルは、12 個を 1 グースと束ねてよぶように、簡単に教えやすいように思われるが、次の点が問題となる。この仮定には、物質量の測定において、 N 個程度の要素粒子群を正確にコントロールできるという前提が必要である。なぜならば、単位系における単位は、測定の基準として定められるもので、測定に利用できなければその役割を果たせないからである。この前提は、例えば、ここに炭素の試薬瓶があると、そこから適当量を取り出し、その中の N 個程度の炭素原子を必要な有効桁で数えられることを意味する。だが、それは、現在の科学技術では、 N が膨大すぎて全く不可能である。すなわち、上の仮定は、現実には使えない単位を定義していることになるのである。結局、個数による物質量の定義は、現在の科学技術では不可能な、膨大な数の原子や分子を数えているとする誤解のもとになるし、単位を用いる測定という教育すべき大事な内容をとばすことにもなる。未来の話であるが、 N 個程度の要素粒子群を正確にコントロールできるようになれば、その方法を使う物質量の定義と測定法は、現在とは全く異なるであろう。

物質量の考え方を身近にあるもの、例えば、ボルトとナットを用いて説明する場合がある。ボルトとナットの二群が与えられているとする。ボルトにナットをはめることは、物質量における一対一対応に相当する。この場合のボルトあるいはナットの総量が、質量では無論のこと個数でも定められるのは、その個数が正確にコントロールできる程度に少ないからである。この点が、 N 個程度の要素粒子数からなる物質量との違いである。したがって、ボルトとナットのような身近な例を用いて、物質量の考え方を教える重点は、一対一対応だけで (個数によるのではなく)、それらの総量を決めていくことにある。

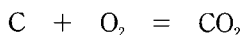
3. 物理量としてのモルと物質量測定法の原理

物質量は、長い間特別な名称もなく、モル数などとよばれて便利に使われてきた。この物理量に“amount of substance”という名称が与えられたのは1960年代末¹⁰⁾であり、モルは、1971年の国際度量衡総会(CGPM)で基本単位⁶⁾としてSIに加えられた。因に、SIは1960年にCGPMで採択されている。SIでいう単位⁸⁾とは、ある同一の次元をもつ物理量(複数)の中から、基準あるいは標準として選ぶ物理量をいう。SIでは、物質量の基本単位としてモル(mole)を、単位の記号としてmolを、採用する。そこで、ある物質を基準物質として、そのある物質量を何かの方法でmolと定める。次に、別の物質の物質量を n として、 n とmolとを要素粒子間で一対一対応させて、 n はmolの何倍かを知る。この操作がmolを用いる測定である。そこで、 n/mol は数値となる(/ は割算の記号)。

SIでは、質量数12の炭素(^{12}C)を基準の物質とし、その0.012kgに相当する物質量を単位に選ぶ。すなわち、この物質に含まれる原子と同数の要素粒子を含む系の物質量を、molと定めている。つまり、最初に要素粒子数を決めるのではなく、 ^{12}C という物質の物質量を質量に

よって決めておいて、単位物質量の定数（アボガドロ定数）は測定にまかせたのである。高等学校教科書のように、アボガドロ定数をモルの定義に用いる問題点は、前節で述べた。SIモルの定義では、 ^{12}C のモルあたりの質量つまりモル質量（molar mass）を、 $0.012 \text{ kg/mol} = 12 \text{ g/mol}$ （厳密に）と定めたことになる。化学の歴史が教えるように、質量 12 g は、天秤であつかえる物質量が、その程度であったことに起因している。後の例にみるように、物質量の測定は、SIモルの定義だけを使って、実際にできることがわかる。

測定法の原理、つまり、単位と測定する物理量との間の比較の仕方は、どの単位の理解にも欠かせない。単位 mol を用いて物質量という物理量を測定する原理は、前節で述べたように、異種の要素粒子間の一対一対応である。化学量論的（古典的）測定方法は、物質同志を化学反応により対応させる。例えば、気体酸素と二酸化炭素の物質量を求める化学的原理は、極めて簡単である。炭素（ ^{12}C ）と気体酸素が反応して、二酸化炭素が生成されるとする。この反応で



消費される炭素の質量を m_c とすると、SIモルの定義によって、その物質量は、 $m_c/(12 \text{ g mol}^{-1})$ と決定する。上述の化学量論式が示すように、関係する三者の要素粒子は一対一対応しているのだから、三者の物質量は互いに等しい。そこで、気体酸素の質量が m_{O_2} であれば、そのモル質量は $m_{\text{O}_2}/(m_c/12 \text{ g mol}^{-1})$ と測定されたことになり、気体酸素の測定値が体積 v_{O_2} であれば、その測定時の温度と圧力におけるモル体積 $v_{\text{O}_2}/(m_c/12 \text{ g mol}^{-1})$ を得る。二酸化炭素のモル質量やモル体積も同様に求められる。こうして、炭素以外の物質のモル質量が測定できると、炭素基準を離れることもできる。物質量は、質量や体積をもとに、測定される点に注意すべきである。

一般に、ある気体酸素の質量を測定して x を得たとしよう。すると、このときの物質量は

$$n(\text{O}_2) = x/(m_{\text{O}_2}/(m_c/12 \text{ g mol}^{-1}))$$

となる。この式、 x 割る気体酸素のモル質量、の分母は化学量論式における対応の結果なのだから、 x を測定しただけでは、気体酸素の物質量を測定したとはいえない。モル電子天秤の工夫²⁾の誤解はここにある。物質のモル質量やモル体積を既知として利用するのが、モル電子天秤、モル気体ビュレット、モルシリンダーの工夫²⁾である。モル電子天秤の工夫では、物質量を直接的に測定できるので、その導入は化学教育で有意義だとしている。物質（の化学式）とモル質量の換算表を用意しておく。まず、物質の質量を測定し、物質の種類を入力する。次に、モル質量の換算表を用いて物質量を計算し、その結果を表示する。生徒は、確かに換算のための計算をしないですむ。だが、このモル電子天秤は、その名称とは違って、物質量を測定していない。異種の物質間で要素粒子の比較（一対一対応の測定）をしていないからである。

4. 要素粒子の相対質量とモルの関係について

科学者は、原子と原子の相対的な質量の比（相対原子質量または原子量）を体系的に測定してきた。相対量で考える利点は、系のサイズに依存しないですむ（比例計算ですむことが多い）こと、測定がしやすいこと、などにあると思われる。原子の質量をはっきりと意識して、ある

原子と別の原子の質量の比を問題にしたのは、ドルトン (1805) であった。当時は、原子の質量を直接的に測定できないので、相対的な質量の比を求めたのである。相対原子質量の基準¹¹⁾として、IUPAP (1960) と IUPAC (1961) が、 ^{12}C の核種を厳密に 12 と定めている。このことを $^{12}\text{C} = 12$ と書くことがある。前節の化学量論の方法は、実は相対原子質量の測定法であった。現在では、質量分析法のように、原子の直接比較によって相対原子質量が定められる場合もある。

要素粒子間の一対一対応が教えるように、二種の物質において、モル質量の比は要素粒子の質量の比に等しく、それはさらに要素粒子の相対質量 (相対原子質量や相対分子質量など) の比に等しい。これらの比の等価関係は、物質の基準や相対質量の基準の選び方に依存しない。そこで、両者の基準をうまく選べば、大変便利になるはずで、実際にそうされている。SI モルと IUPAC 原子量基準とは互いに無関係に定義されているが、両者に現れる数字 12 がそれである。つまり、SI モルにおける 12 g の 12 と、IUPAC 原子量基準 $^{12}\text{C} = 12$ の後の 12 である。 ^{12}C のモル質量 12 g/mol の例にみられるように、モル質量 (単位 g/mol) の数値が相対質量と一致している (そのように意図的に定めた)。換言すると、モル質量がわかれば、要素粒子の相対質量がわかり、その逆も正しい。そこで、相対原子質量や相対分子質量などにグラム (g) をつけた量を、モルとよべるように思われてくる (歴史的な、グラム原子やグラム分子の定義)。だが、この定義では、物質はどのような物理量なのか、単位の物理量は何か、物質を直接測定するにはどうすればよいか、などがはっきりしない。つまり、グラム分子をモルとよぶ定義は、物質という物理量や次元、単位などを、明確に意識していないといえる。前節の SI モルの定義との違いである。モルの定義において、SI の外の定義である IUPAC 原子量基準を使わない方が、モルを基本単位とよぶのにふさわしい。

種々の基準を変えると物理定数はどうなるかというテーマ¹²⁾が、生徒の思考を訓練するとして、出題されることがある。この問題は、SI 風に考えれば、ある次元の単位の選び方にすぎないので、直ぐに解ける。SI モルの定義において、12 g を 120 g と読みかえて、モル120仮定とよぶことにする。この仮定では、 ^{12}C のモル質量を 120 g/mol (厳密に) と定めたことになり、物質の単位は、SI モルの場合の 10 倍大きくなっている。そこで、モル120仮定のもとでは、モル質量やモル体積、さらに、アボガドロ定数 (mol 中の要素粒子数)、ファラデー定数 (アボガドロ定数と電子の電荷との積)、気体定数 (標準状態における圧力わる温度かけるモル体積) などが、SI モルの場合の 10 倍となり、一方、物質濃度 (またはモル濃度、溶液の単位体積あたりの溶質の物質質量) や質量モル濃度 (または重量モル濃度、溶媒の単位質量あたりの溶質の物質質量)⁹⁾は、SI モルの場合の 1/10 となる。次に、SI モルの定義で、 ^{12}C の 12 g を ^{19}F の 19 g と読みかえて、モル F19仮定とよぶことにする (^{19}F のモル質量を厳密に、19 g/mol と定めたことになる)。物質の単位は、SI モルの場合と比べると少し大きくなっている ($^{19}\text{F} = 18.998$ だから)。そこで、モル F19仮定のもとでも、モル120仮定と同様に解答できる。SI モルの定義で核種と質量を読みかえるこの段落の議論は、文献¹²⁾では相対質量 (原子量) と関連させて考察しているが、上の二仮定の結果が示すように、相対質量の基準とは全く関係がない。このことは、次節の物質展開図を用いれば、より容易に説明できることである。

IUPAC 原子量基準の $^{12}\text{C} = 12$ を、 $^{12}\text{C} = 120$ と読みかえて、原子量120仮定とよぶことにする。SI モルとモル120仮定とモル F19仮定のいずれかと、IUPAC 原子量基準と原子量120仮定のいずれかとを、定義として採用しても、前々段落で述べた三種類の比の等価関係は無論、成

立している。モル120仮定と原子量120仮定を同時に採用すれば、要素粒子の相対質量とモル質量 (g/mol) の数値が一致する；すなわち、標準モル質量 1 g/mol で物質のモル質量を割ると、要素粒子の相対質量に等しくなる。こうして、SI モルと IUPAC 原子量基準における、前述の数字 12 は任意に選べること¹¹⁾がわかる。

本稿では、単位としてのモルは、1 mol とせずに mol と記述してきた。両者の差は一見どうでもよいようであるが、その背景の違いは科学教育において重大である。既に指摘⁹⁾したように、日本の初等中等科学教育では多くの単位が、物理量ではなくて、単に印 (記号) あるいは目盛としてあつかわれている。そこで、序論の例のように、1 mol がモルの定義に含まれるのであろう。一方、SI ではある物質の物質質量 n を、mol を基準に測定して、 $n = 1 \text{ mol}$ が得られるときに、1 mol というのである。SI モルの定義⁹⁾の原文は、“The mole is . . .”であり、“One mole is . . .”とは使われていない。基本単位である mol は、物質質量という次元の中から選ばれた基準であり、物質質量の測定法とは別に定められている特別な物理量なのである。

5. 物質の展開図を用いるモルの導入法

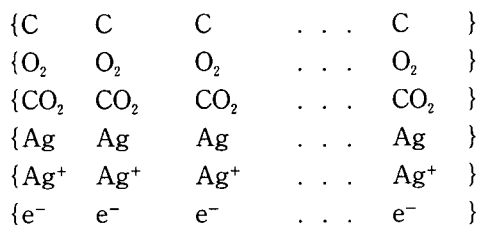
前節までの議論を参照しながら、モルの指導上の要点をまとめると以下ようになる。まず、モル導入の準備について述べる。“単位 1 モルで測定される物質の量を物質質量”という表現もよくみかける。生徒は、ものさしの 1 m を理解してから、長さという物理量、例えば、身長とか机の中とかを受けいれるわけではない。計器 (や単位) は感覚の延長であり、その逆ではない。生徒には、物質質量という物理量 (この名称は提示しなくてよい) の感覚を、モル (単位) の学習以前に、つかませる必要がある。それには、第 3 節の例のような、化学量論に関する実験と演習を欠かせない。教科書の通例にしたがえば、モル導入以前に、化学量論式を利用して相対原子質量や相対分子質量を導入することになる。このときは、化学量論式内の原子数や分子数の比が一定であることを強調する。一方、物質質量の導入のための化学量論式は、その化学量論係数が全て 1 の場合がよいと思われる。異種の要素粒子間の一対一対応がはっきりしているからである。化学量論的な実験の経験に加えて、炭素と直接的に、または、異種物質間で、一対一対応を示す例題を数多く用意し、練習させる。炭素が燃焼して二酸化炭素となる前出の反応もその一例であり、また、金属の銀が 1 価のイオンとなる例なども考えられる。ここまでの段階の例題は、モル導入後にモルを用いて見直すのがよい。



次は単位の導入となる。物質質量の定量のために、炭素の物質質量を、単位として繰り返し用いる。炭素の同位体が未学習の段階や粗い近似でもよい場合では、物質質量の単位として、化学元素としての炭素 12 g を使えばよい ($C = 12.011$ だから)。炭素の選ばれた理由¹¹⁾として、歴史的な経過や化学的な性質 (多原子分子をつくりやすく、水素との化合物をつくるなど) にふれる。物質質量測定法の原理として、異種の要素粒子間の一対一対応を、最重点に教えるべきである。だが、このとき、測定値にすぎないアボガドロ定数にこだわるのはさける。化学反応により物質質量を測定することは、実は異種の要素粒子間で対応させているのだとわかればよい。生徒は、膨大な定数 (アボガドロ定数) を感覚的に理解できなくても、単位である mol を用い

て、物質量の測定ができるのである（科学者が化学量論的方法でしてきたように）。

教科書のモルの説明図¹⁾では、 6×10^{23} 個程度の原子の山が、天秤の左右の皿の上にあり、それらの質量を比べている。これらの図とは違って、本稿では、異種の要素粒子間の一対一対応を重視して、要素粒子の集団を、以下のように縦横に展開する方法を提案する。その縦横展開図を用いて、物質量、単位としてのモル、モルを用いる測定法の原理（異種の要素粒子間の一対一対応）、モル質量、アボガドロ定数やファラデー定数、さらに相対質量とモル質量との関係、などを説明するのである。



炭素原子の集合を上図の上段一行（横一列）のように板書する。ここで、Cは炭素原子をあらわし、{ . . . }は、数学の集合の記号と同様に、まとめてあつかう要素粒子群（集合）、つまり、物質を示す。酸素気体分子 O_2 、二酸化炭素分子 CO_2 なども、それぞれを一行（横一列）に、炭素原子の下に対応させて並べて、{ . . . } のようにくくる。炭素 12 g 分の { . . . } が物質量の単位で、これを mol とあらわす。これで、炭素のモル質量を厳密に、12 g/mol と定義したことになる。この { . . . } を2 倍にすれば、2 mol であり、1/1000 にすれば、1 mmol であると説明する。ものさしの 2 m や 1 mm と同様な使い方である。いずれの物質 { . . . } も、炭素の一行と一対一対応しているので、物質量は互いに等しい。気体酸素 O_2 と二酸化炭素 CO_2 の例に見られるように、対応する要素粒子中の原子数の違いに気づかせる。

次に、縦の列でみると、異種の要素粒子の質量比は、相対質量（相対原子質量や相対分子質量など）のことであり、対応と比例関係をもとに、モルあたりの質量の比に等しいことがわかる。そこで、相対質量とモル質量の数値が一致するように、二つの基準を選べば便利だと、指摘する。物質 { . . . } のモルあたりの物理量を、測定したとする。対象とする物理量が、質量ならばモル質量を、要素粒子数ならばアボガドロ定数を、イオン（1 価の場合）の電荷ならばファラデー定数を得ると、生徒に説明する。これらの物理量は測定値にすぎないので、概数を提示すればよい。示強性 (intensive) 物理量であるモル質量は、行の長さの増減で不変な量として物質に固有であり、単位体積あたりの質量である密度と類似していると、示唆するのよい。

注 と 文 献

- 1) 蓑手重国, 化学と教育, 42, 14 (1994)。
- 2) 松原静郎 他, 化学と教育, 43, 395, 725 (1995)。
- 3) 石川朝洋 他, 化学と教育, 44, 325 (1996)。

- 4) 物理 I B, 三省堂 (平成 6 年 3 月)。新物理 I B, 第一学習社 (平成 6 年 2 月)。物理 I B, 第一学習社 (平成 6 年 2 月) など。
- 5) 化学 I A, 化学 I B, 三省堂 (平成 6 年 3 月)。高等学校新編化学, 第一学習社 (平成 6 年 1 月)。高校化学 I B, 実教出版 (平成 6 年 1 月) など。なお, 化学 I B, 大日本図書 (平成 6 年 2 月) では, SI モルの定義を採用している。
- 6) I. Mills *et al.*, "Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry," IUPAC, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1988) ; second ed., 1993. 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)。
- 7) 青野 修, 次元と次元解析, 共立出版 (1982)。
- 8) 上越教育大学研究紀要, 16(1), 279 (1996)。SI 接頭語マイクロは, ローマンスタイルで印字するように, 特別に注文したものである。
- 9) 遠山 啓 編, 現代化数学指導法事典, 明治図書 (1971)。
- 10) M. L. McGlashan, "Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units" (Adopted by the IUPAC Council, on 7 July 1969), IUPAC, Butterworths, London (1970)。物理・化学量および単位に関する記号と術語の手引, 日本化学会標準化専門委員会 (1973年 4 月)。
- 11) 斉藤信房, 化学教育, 26, 118 (1978)。原子量基準についての歴史や詳しい解説がある。さらに, "Element by Element Review of Their Atomic Weights," *Pure & Appl. Chem.*, 56, 695 (1984) もみよ。
- 12) 西原 浩 他, 化学と教育, 35, 266 (1987)。引用文献も参照せよ。

Method for Teaching the Unit “Mole” as a Physical Quantity

Tetsuo MORIKAWA* and Yasuko NISHIYAMA*

ABSTRACT

In high-school textbooks and education journals there are descriptions of the concept of mole such that the amount of substance is treated as a numerical value and such that one mole is defined by use of the Avogadro constant. It seems that such statements are confusions and/or misunderstandings from the point of view of the International System of Units (SI). This paper discusses what the amount of substance as a physical quantity is and how the amount of substance is measured in terms of the mole. We propose an arrangement of chemical symbols, called a sheet of substance, written in rows and columns, in which every elementary entity for one standard substance (i. e., carbon-12 in SI) is aligned in row form, and each elementary entity for another substance has one-to-one correspondence to the carbon-12 atom. This sheet of substance would become a useful tool for us to teach students physical quantities (mole, molar mass, Avogadro constant, Faraday constant, relative mass, etc.) and the principle of measurement of the amount of substance.

* Division of Science