

物質質量とモルをめぐる「思い違い」 —— 教師教育のための分析と教材化 ——

森 川 鐵 朗*

(平成17年4月25日受付；平成17年6月6日受理)

要 旨

一連の授業研究（『上越教育大学研究紀要』など）では、高校化学における物質質量とモルに係る多くの「思い違い」を明らかにしてきた。本論文では、これらの「思い違い」を教師教育のために積極的に教材化する。「思い違い」の教材化は、科学教師と科学学習者の「科学する力」を鍛えるために、有効であると思われる。

KEY WORDS

misconceiving	思い違い	teaching materials	教材
chemical amount	物質質量	mole	モル（名称）
units	単位	handle science	科学する
science teachers	科学教師	teacher education	教師教育

1 はじめに

国際単位系 SI^{1,2)}では、七種類³⁾の基本単位を選び出し、モル (mole) はその一種とされ、単位の記号としては (e なしの) “mol” を使う。SI の定義文では「モルは 0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子を含む系の物質質量」となっている。つまり、モルという単位は (ある) 系の物質質量 (“amount of substance” あるいは “chemical amount”) のことだ、と述べている。物質質量は「物質の量」ではなくて、まとまった一つの概念である。本稿では、この定義文の骨格を「モルは…系の物質質量」と引用し、「等しい数」そのものを以下、 N と記す。この N は現在「 $6.02 \dots \times 10^{23}$ 」と測定されている。

物質質量という物理量は、日本の科学教育では中等教育課程の後半で導入される。以下で順次取り上げるように、日本の教科書・参考書・啓蒙書など⁴⁻¹⁴⁾では、モルは「ダースのような (数を束ねた) 単位」とか「(個) 数」のこととか説明されている。そこでの文脈は数式風には、次のようになる。

$$1 \text{ mol} = N \text{ あるいは } 1 \text{ mol} = N \text{ 個}$$

しかしながら、この説明では、SI の定める単位が単なる「数 (すう)」であるはずがない、数はいくら束ねても数である、数は物理量とは違うはずだ、というような疑問に答えられない。

* 上越教育大学自然系教育講座 〒943-8512 上越市山屋敷町 1

海外英語圏¹⁵⁾では、このような「数を束ねた単位」を“counting unit”とよぶ。例えば、ダースはごく身近な“counting unit”で「1 doz = 12」と書ける。英国の化学教育雑誌では、30年も前に「モルは“counting unit”ではなくて、物理量である」と批判され、論争は既に決着している。モルは「数を束ねた単位」説は、SIの単位に関する典型的な「思い違い」といえる。一連の報告²⁰⁻⁵⁷⁾で物理量の、特に物質質量とモルとの、授業研究を進めてきたが、本稿ではそれらの研究成果に基づいて、物質質量とモルとをめぐる上述のような「思い違い」そのものの教材化をはかる。このような「思い違い」が日本の化学関連書で広範囲に採用されている事情は、思い違いそのものがよい教材になり得ることを示唆しているからである。

化学教育では、モルは基本中の基本とされている。化学教育者は「モルは難しい、理解できない」とはいえないし、まして「高校教科書の説明がわからない」とは公然とはいえない。「モルは…系の物質質量」なのだから、生徒がモルを理解するためにはまず物質質量を理解できなければならない。長さや質量では、記号表現に慣れてしまっていて、自然科学のもっとも基本的な物理量や次元や単位についての理解があいまいであっても、何とか済ませられた。ところが、このあいまいさは、記号表記法によって隠されていても、物質質量を理解しようとするとき「ダースのような（数を束ねた）単位」説のように、はっきりと現れてしまうのである。この説が日本では驚くほど広く深く受け入れられているのは、教師側の自然観や科学観^{16,17)}をも反映しているのであろう。したがって、物理量と単位（物質質量とモル）の学習は科学を理解して、自然を「科学する力」を鍛えるために有効なはずだ。物質質量とモルの理解には、物理量の次元や測定原理、自然現象の解析法則化などの理解が欠かせないのだから。

物質質量（という物理量）を正確に理解するための鍵語は本授業研究²⁰⁻⁵⁷⁾で明らかにしてきたように、要素粒子、つぶ構造、測定原理、一対一対応、次元などである。これらの鍵語は、日本の中等教育課程ではほとんど扱われないので、以下で節を改めて説明する。モルは「数を束ねた単位」説の起因は、論理の包含関係に対するあいまいさ、個々の原子・分子と要素粒子（という集合）とを区別できていないこと、物質質量が物質の「つぶ構造」に関与する特性であると理解していないこと、個数を物理量の次元とみなすこと、物理量の測定原理の欠如などにあり、結局は各種「思い違い」は上記の鍵語をめぐって起っていると思われる。このように原因を分析することで、物質質量とモルを一般の物理量指導のための教材としても利用できるのである。

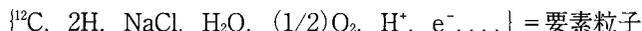
本稿では、日本の化学教科書・化学啓蒙書・化学教育誌⁴⁻¹⁹⁾などにみられる物質質量の理解をめぐる「思い違い、あいまいさ、誤解」を、化学教育に積極的に生かすことを提案する。先達が間違えた学習場面は、児童・生徒・学生（初等中等高等教育課程での学習者以下、学習者）にとっても間違いやすい教材に直面しているということであり、「思い違い」があるとの指摘は揚げ足取りのためではない³²⁾のである。先達によって作成されたこれら化学関連書は、科学教師により教訓を与えるはずである。本稿では、物質質量学習にみられる「思い違い」を分析し、教師教育（中等教育）のための教材化をはかる。

2 物質質量とモルの考え方について

一連の本授業研究²⁰⁻⁵⁷⁾では、いくつかの用語、例えば、一対一対応、同一視、つぶ構造などを導入しながら「物質質量の教材化」をはかってきた。これらの鍵語は化学の標準的な教科書には出てこないし、さらに、物質質量の次元、要素粒子ひと粒の物質質量などは世界の文献にもみあ

たらない。そこで「思い違い」だと指摘する根拠を示すためにも、本授業研究における物質とモルの考え方について、まず要約する。

物理量としての物質を理解する出発点は、要素粒子“elementary entity”の扱い方にある。SIにおけるモルの定義文¹⁾は前後に分かれていて、その前半は「モルは…系の物質質量」で、その後半で要素粒子を説明する。要素粒子とは「原子、分子、イオン、電子、その他の粒子またはこの種の粒子の特定の集合体」とある。炭素-12原子、水素原子ふた粒、などを使って、要素粒子を表してみる。要素粒子は、化学記号を使って指定するように推奨²⁾されている。



要素粒子では、原子が実際に結合してなくて（例えば、水分子中の2Hなどで）もよいし、個々の分子ではなくて（塩化ナトリウム中のNaClで）もよいことに注意する。この要素粒子の代表を記号で、Bと記す。要素粒子Bからなる物質の物質質量を $n(\text{B})$ のように記す。このように要素粒子を用いる記号は、化学でよく見られるが、要注意である。例えば、 $n(\text{H}_2\text{O})$ は多数の要素粒子 H_2O の物質質量（試験管中の水など）を指すのであって、要素粒子ひと粒 H_2O の物質質量ではない。ひと粒の物質質量は以下、 $n_a(\text{B})$ のように下付き記号を使う。要素粒子とは集合（類）の名称であるが、具体物である（例えば）2Hを要素粒子とよぶこともある。このときの2Hは要素粒子の代表である。要点は、原子や分子や電子などいろいろな（物理的・化学的性質の違う）粒子を「同一視」して、要素粒子とみなしていることにある。水素原子や酸素分子などをツバメやスズメに例えると、要素粒子は「鳥」に相当する。現実空を飛んでいるのはツバメやスズメであって、「鳥」は集合（という意味では抽象的）である。つまり、具体物とそれらを集めた「概念」とを区別して、しかも、この「概念」には（対象とする）具体物全体が共有する特性を持たせている。後で出てくるが、物質質量は「要素粒子ひと粒ではどれも同じ」と説明する。水素原子や酸素分子など個々の粒子の違いにこだわってはいない、物質質量とモルとを理解できない。原子や分子を集めそれら（に共通の性質をもつ）全体を把握できたときに「要素粒子」という概念を把握できるのである。

体積は空間的な広がりという物質の特性を示す。質量は、慣性・重力という物質の特性に関係する物理量である。では、物質質量は、物質のどのような特性に関与するのだろうか？日本の化学教科書や化学啓蒙書などには、この疑問の答えは見当たらないようだ。モルを定義する公式文書（SI）は「モルは…系の物質質量」と定めているだけで、物質質量とは（そもそも）何かの説明はない。この文書は単位を定めるためだから、当然かもしれないが、体積や質量（など、そのもの）についても説明はない。物質質量の関与する特性とは以下で説明するように、物質の「つぶ構造（不連続性）」である。この特性は、空間的な広がりや慣性・重力に加えて、物質の重要な特性と考えられる。それ故に、モルはSIの基本単位の一として採用されたのであろう。倉庫に積み上げられた穀物の山を化学物質に例えてみる。どの山も遠くからみると一塊の山であり、近付いて細かくみると、いんげん豆の山も小豆の山も（豆の種類によらず）つぶつぶに見えてくる。

物質質量を考察するための基礎として、物理量一般の測定方法（測定原理）についても知らねばならない。最近の高校化学の教科書にも、フレーズ「物理量は数値と単位との積」を見かけられるようになった。このフレーズの出典は、Maxwell (1873) による有名な「電磁気学」の序言

にまでを遡れる。「量 (quantity) のどの表現も二つの要素からなる。一つは、参照のための標準として使われ、表現される量と同じ種類の量である。もう一つは、表現される量をつくりあげるために、標準の何倍かを示す要素である。標準の量は単位 (unit) といい、何倍かはその元の量の数値 (numerical value) という。」彼は、物理量 (physical quantity) といわずに、量 (quantity) を使っている。見通しをよくするために、ここでの言い回しを式に表してみる。

$$q = a \times u$$

ここで、 q は「物理量」で、 a は「数値」で、 u は「単位」である。ある物理量 q の測定とは、それと同じ種類の物理量である単位 u をもってきて、何倍かと比較し、 q/u という数値 a を求める作業のことだ、と上式は述べている。例えば、パックの牛乳の体積 V が単位 mL の 250 倍あったら、 $V/\text{mL} = 250$ なので、パックには ($[V =]$ は省略されて) 250 mL と記されるのである。つまり、上の式 (あるいは、フレーズ) は「物理量の測定 (比較) の仕方」を一般的に述べているのであった。具体的な「測定方法」は無論、物理量ごとに違っている。ある物体の質量を測定しようとするときは、天秤で別の質量 (分銅) と比較する。水の体積を測定するときは、別の体積 (例えば、メスシリンダ) と比較する。どちらの結果も、上の式のように表されるのである。

古典的な物理化学の法則 2 種、アボガドロの法則と凝固点降下、を思い出そう。同温同圧の気体 (十分に希薄) では、その体積 V は粒子の数に比例する (日本の教科書ではこのように、粒子の「数に比例する」とよく見かける) とアボガドロの法則はいう。粒子の数に比例するこの物理量を n と表すと、この法則は次の第 1 式のように書ける。

$$V \propto n$$

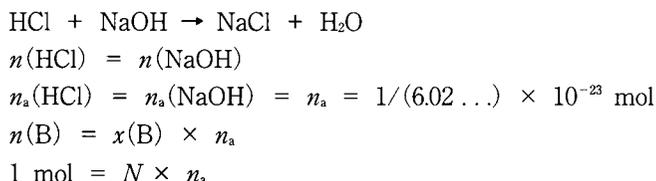
$$\Delta T \propto c = n/V$$

ここで、右辺が「数 (すう)」ではない (数は物理量ではない) ことに注意する。同種の物質では、粒子の数に比例する物理量として質量や体積がよく知られているが、右辺は体積でも質量でもない。この法則で粒子の種類に依らないということは、気体酸素と気体窒素とを例にとると、同じ粒子数ならば、 $n(\text{O}_2) = n(\text{N}_2)$ と書けることだ。希薄溶液の凝固点降下では、温度の降下度は濃度 c に比例するので、上の第 2 式と書ける。ここで、 c は (溶媒が与えられれば) 溶質の種類に依らない、が大事な点である。そこで、 c を (ある体積中の溶質粒子の数に比例する物理量) n/V と考えれば、ここでもある物理量 n が働いている。

ここまでの法則の要点は二つあった。右辺の物理量が、粒子の数に比例する (が、粒子の数そのものではない) ことと粒子の種類に依らないこと、である。粒子 (原子や分子など) の種類に無関係ということは、別々の粒子を「同一視」すればうまくいく (同じものだとみてよい) ことになる。自然法則 (上式) が示すように、人が勝手に (空想して) 同一視しているのではない点が必要である。既に考察した「要素粒子」を使えば、問題の物理量 n がうまく表されることがわかる。つまり、原子や分子の種類に依らないということは、要素粒子として考えればすむのである。物質質量を使えば、上の自然法則 2 種が示すように、物理的世界をうまく捉えられることになる。問題の n は、粒子の種類に無関係で、しかも、粒子の数に比例するのだ

から「示量性 extensive」の物理量であることがわかる。法則の2要点は、結局は「どの要素粒子でもひと粒では同じ物質」と、示唆していることになる。個性をもつ原子や分子の世界を「ドルトンの」とよぶならば、原子や分子を「つぶ」(要素粒子)とみているような世界は「アボガドロ的 Avogadro-like」といえよう。物質を理解するとは、物質の世界においてアボガドロ的認識に到達することなのである。

物質のここまでの説明を典型的な化学量論式(化学の考え方)で確認してみる。化学では、塩酸と水酸化ナトリウムとが中和する(次の第1式:要素粒子 HCl と NaOH とが1回反応



するならば、何回でも起る)とき、第2式のように、両化学物質の物質量は等しい、と考える。この等式(物質量のバランス式)は、第3式の最初の等号「どの要素粒子もひと粒の物質量は同じ」を示唆する。なぜなら、 n は要素粒子の数に比例し要素粒子の種類に無関係だからである。そこで、第3式の第2の等号が成立する。すなわち、 $n_a(\text{B})$ からは B をはずしてもよいことがわかる。一般的に、要素粒子 B からなる化学物質の物質量は、要素粒子の数を $x(\text{B})$ とすれば、第4式と書ける。気体窒素 N_2 と気体酸素 O_2 とを1対1の物質量比で混合すると、物質量は、一对の N_2 と O_2 を要素粒子ひと粒とみなせば、 $n(\text{N}_2 + \text{O}_2)$ となる。この結果は第4式からは当然であるし、逆に、混合気体は、マイクロなバランス式

$$n_a(\text{N}_2) = n_a(\text{O}_2) = n_a(\text{N}_2 + \text{O}_2)$$

を説明するよい教材となる。ここでの物質量計算では、温度、圧力、体積を指示していないことに注意する。このような、物質の種類に依存しない、「要素粒子ひと粒の物質量」は極めて重要な物理量であり、われわれの授業研究において初めて認めたものであるが、国内外の文献ではほとんどみかけないし、その記号もないようだ。この物理量 n_a は事実上は測定されている(アボガドロ定数の逆)と思われるから、不思議ではある。第4式の $n(\text{B})$ を 1 mol と選べば、第5式を得る。これで、前出「1 mol = N 」(モルは数を束ねた単位)説のどこを修正すればよいか、が明らかになった。

IUPAC では炭素-12の質量 $m_a(^{12}\text{C})$ を十二等分して、その一つ分を「統一原子質量単位」とよび、記号として m_u や u や Da (ドルトン)をあてる。採録されている(おおよその)測定値を、次の第1行の()の中に示す。そこで、要素粒子 B のひと粒の質量 $m_a(\text{B})$ をこの m_u を単位として測定して、そのときの数値を $A_r(\text{B})$ と書く。すると、次の第2式のように「物理量 = 数値 × 単位」と表記される。この式の B を ^{12}C と選べば、ここまでの $A_r(\text{B})$ の定義は第3式に相当する、とわかる。ここでの $A_r(\text{B})$ は、相対(原子、分子)質量とよばれる。炭素-12の1gを単位 m_u で測定すれば、第4式を得る。この第4式(1gの式)と前段落の第5式(1molの式)を比べると、興味深い。

$$m_u = m_a(^{12}\text{C})/12 (= 1.66 \dots \times 10^{-27} \text{ kg})$$

$$m_a(\text{B}) = A_r(\text{B}) \times m_u$$

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

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

物質の物質質量を実際に知るにはどうするか。まずは、間接的な方法を取り上げる。SI の定義「モルは…系の物質質量」は直ちに、次の第 1 式 of モル質量 $M(^{12}\text{C})$ を示唆する。つまり、炭素-12 のモル質量は厳密に 12 g mol^{-1} に等しい。一方、IUPAC では既に説明したように、この炭素-12 に対して、相対質量 $A_r(^{12}\text{C})$ を厳密に 12 と定めている。そこで、酸素を例にとつて、モル質量と相対質量の商を計算すると、第 2 式のようになる。

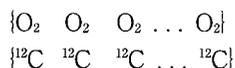
$$M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol (厳密に)}$$

$$M(\text{O}_2)/M(^{12}\text{C}) = A_r(\text{O}_2)/A_r(^{12}\text{C})$$

$$M(\text{O}_2) = A_r(\text{O}_2) \text{ g/mol}$$

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

上の第 2 式以下は、次のように考えるとよい。まず、二種類の化学物質、気体酸素と固体炭素-12、の要素粒子を上下を揃えて並べる。ちょうど上下が揃っている場合とする。



ここでは、 $n(\text{O}_2) = n(^{12}\text{C})$ つまり、要素粒子が一対一対応しているので n は等しい。そこで、 $M(\text{O}_2)$ と $M(^{12}\text{C})$ との商は、 $A_r(\text{O}_2)$ と $A_r(^{12}\text{C})$ との商に等しい。故に、上の第 2 式を得る。この第 2 式に、 $A_r(^{12}\text{C}) = 12$ と第 1 式とを挿入すれば、第 3 式を得る。酸素分子の代わりに、一般的な B でも同じように考えてよい。つまり、最後の式が成立する。要素粒子 B からなる物質のモル質量 (単位は g/mol で) の数値は、B の相対質量に等しい! こんなうまい式になるには、仕掛けが二つあった。モルの定義で基準の原子に対して 12 g を使った (SI による) ことと、同じ原子の相対質量を 12 とした (IUPAC による) こと、である。こうして、化学で基本となる最後の式、 $M(\text{B})$ と $A_r(\text{B})$ との (名前のないらしい) 関係式が得られた。なお、この関係式は、 n_a を使ってモルの定義を解釈すれば、より簡単に求められる。要素粒子 B からなる物質 1 mol の質量 $m(\text{B})$ は、 N と $m_a(\text{B})$ との積に等しくて、それはさらに $A_r(\text{B}) \text{ g}$ に等しい。一方、この物質の物質質量は、 N と n_a との積に等しい。そこで、 $m(\text{B})$ を 1 mol で割算すればよい。

一般の $A_r(\text{B})$ は無論、表から (B に相当する総和として) 求められる。表の数値は、質量分析法などで、 m_u を基準にして測定されている。与えられた化学物質の質量を天秤で測定して、 m を得たとする。さらに、この物質の要素粒子 B がわかっているとしよう。すると、 $M(\text{B})$ が求められる。したがって、物質質量 $n(\text{B})$ を求めるには、この m を $M(\text{B})$ で割算すればよい。物質質量を求めるこの方法では要するに、物質質量を直接的に測って (比較して) いるのではなくて、換算している (あるいは、 $A_r(\text{B})/A_r(^{12}\text{C})$ で比較をすませている) のである。

物質質量を直接的に比較する測定法は、例えば、古典的な物理化学の法則を利用する。既に、希薄溶液の凝固点降下の法則を述べた。溶質粒子を B とする溶液の濃度を $c(B)$ 、そのときの凝固点降下度が $\Delta T(B)$ ならば、 $c(B)/\Delta T(B)$ は一定と書いて、溶媒の種類が同じならば、溶質の種類にかかわらず成立している。そこで、基準に選んだ物質で、上の一定値を測定して、次に別の物質について降下度を測定すればよい。原理的にはこれでよいのだが、実際には、実験上いろいろな注意が必要である。

上述の説明にみられるように、物質質量を比較する仕方は、要素粒子間の「一対一対応」である。この用語「一対一対応」は化学ではほとんど使われないが、数学では、集合間で要素を比較するもっとも基本的な方法として知られている。生徒は言葉は教えられていないが、この概念を小学校のときから学習している。例えば、みかん2個、犬2匹などを「一対一対応」させて、2と同一視する。このように、数学における「一対一対応」は何を対応させてもよくて、極めて抽象性が高く、数(すう)概念の構成へとつながる。一方、物質質量を測定するときの「一対一対応」においては、物理量としての性質を依然として保持したままである。化学における「一対一対応」は、前出の中和反応式でよく見えた。

本節の議論を要約する。要素粒子という概念を持たなければ、物質の「つぶ構造(不連続性)」を明確に把握できないこと；要素粒子ひと粒の物質質量はアボガドロ定数の逆に等しいこと；モルで測定できる「量」が物質質量であると述べても、物理量の測定原理を表現したものにすぎなくて、物質質量そのものの説明ではないこと；化学物質 B の物質質量 $n(B)$ を直接的に測定するには、別の物質質量である mol (SI の単位) を用意して、両者の要素粒子間で「一対一対応」させること、など。特に、物質質量の理解の要は、物質質量は要素粒子ひと粒ではどれも同じ、とみなすことにある。

3 物質質量をめぐる「思い違い」と教材化について

自然科学の学習において、概念を形成し理解するためには「記述論理」が極めて重要²¹⁾である。記述論理は、原子・分子(具体物)と要素粒子(抽象的な概念)との違いを概念形成の段階から明確に区別する。両者(具体物と概念)は例えてみれば、ツバメ・スズメと鳥との違いであり、この記述論理を意識してこそ、「モルは(個)数」説を避けることができる。自然科学における記述「 X は Y である」がもし正しいならば、 Y は X を含む。科学的概念 Y は記述「 X は Y である」をくり返し学習して形成される。科学的概念 Y がどれほど理解されたか形成されたかは「 Y って何ですか」と質問すればよい。物質質量とモルをめぐる教科書・参考書の表現にはあいまいで多義的な言い回しが多いので、それらの表現も科学的な論理を鍛えるためには好適な教材となる。

モルの説明で「要素粒子」はあいまいなので、具体的な原子(名)や分子(名)を使え、という意見を聞いた。この意見では、物質質量における要素粒子の重要性を認識していないようだ。前節で強調してきたように、個々の原子や分子を区別でき(ドルトンの認識に至っ)ても、物質質量の概念は生まれえない。個別の原子や分子を超えて物質のつぶ構造(不連続性)を認識できた(アボガドロ的理解に到達した)とき、つまり、要素粒子という概念を理解できた後で、物質質量という概念を受け入れられるようになるのである。ツバメやスズメを集めて、さらにそれらの全体を把握できたときに「鳥」という概念が生まれるように、原子や分子を集め、それら

(に共通の性質をもつ)全体を把握できたときに「要素粒子」という概念を把握できるのである。そこで、原子や分子だけでモル(と物質質量)を説明しようとする、物質の特性(つぶ構造)を意識していないので、結局は「モルは個数」とかの説明になってしまうのだろう。

化学学習者にとって、物質質量は物理量の「次元」を考えさせる⁴²⁾よい機会も提供する。かれらは、長さや体積などは慣れ親しんでいるので、次元に無意識でも、うまく扱える。ところが、物質質量は、かれらにとってはほとんど経験がないし、直接比較の難しい「物質のつぶ構造」に係る物理量である。そのため、物質質量は次元を意識しなければ、うまく処理できない。モルは「数を束ねた」説に立つ者は、モル(さらに、物質質量)が物理量としての次元に属すると意識していない、と思われる。数をいくら束ねたとしても、結果は数であり、数は無論、物理量ではないからだ。モルは「数を束ねた」説に立っても、物理量の次元というものを意識しなければ、違和感を抱くことはないであろう。モルは「数を束ねた」説に立って、しかも、SIの単位はどれも、物理量の次元に属すると考える者は、モルがSIに入っていることを、なんて中途半端なのだろうと考えるかもしれない。

まず、長さや体積や質量も次元として学習し、次に、物質質量の次元を導入してもよい。いろいろな化学物質のいろいろな物質質量を集めて、その集合(全体)を「物質質量の次元」とよぶ。SIの定める「モルは…系の物質質量」だから、この定義によるモルは物質質量の次元に含まれる。このときの包含関係を「モルは物質質量である」という。さらに、体積や質量や物質質量などの次元を集めて、それら全体(の集合)を物理量⁴²⁾とよぶ。このときの包含関係を「体積は物理量である」とか「物質質量は物理量である」とかいう。そこで、「モルは物質質量である」り「物質質量は物理量である」という包含関係はこの順序でより大きくなる。そして、数とダースのような「数を束ねた単位」とは、この物理量の枠の外にある。このように「何々(X)は何々(Y)である」と記述するときは、XがYに含まれているときにのみ、正しい。「モルは物理量である」は正しいから、その対偶「物理量でないならばモルではない」も正しい。「モルは単位である」は、モルの他にもメートルやリットルなどの単位があって、モルはそれらの単位の中の一つと述べているのだから、正しい。「モルは単位である」と「単位は物理量である」とを組み合わせると、「モルは物理量である」となるが、この三段論法では、モルは物質質量の次元に属することが明らかにならない。以上のように、モルとリットル、単位、物質質量と体積、次元、数と物理量などに関係する教材の、概念の形成のための要点は包含関係にある。上述のような包含関係を(学習者に向けて)視覚化するには、中等教育課程では学習済みの、ベン図を利用する⁴⁸⁾とよい。

以上のような単純な包含関係に慣れてきたら、さらに、物質質量をめぐるあいまいな表現を授業で取り上げ、学習者の科学的な論理と表現を鍛えるとよい。教科書・参考書の典型的な例⁴⁴⁾は「アボガドロ数個の集団を1モルとする」とか「1モルはアボガドロ数個の集団」とか、説明される。この文脈は明らかに「モルは…の集団」と述べている。ここで、単位の定義文(SI)の構造¹⁾を思い出す。例えば「メートルは…の長さ」「秒は…の時間」「アンペアは…の電流」などと読める。前段落の、単位と物理量との包含関係(例えば、メートルは長さに含まれる)に注意しよう。「モルは…の集団」では、SIの「系」を「集団」に置き換えているが、この点には触れないとしても、「の物質質量」をはぶいたので、モルが物質質量の次元に属することがあいまい(意味がとれない)になってしまった。「モルは…の集団」では「集団」そのものを1モルと定めているように読めるので、よりはっきりさせるため「集団」の後に、「の質量」「の体積」「の(個)数」「の量」などを(学習者に)入れてもらう。そして、モルは、質量、

体積、個数、のいずれでもない、と説明する。さらに「モルは…の集団の量」では、「量」の含意が広すぎて何を意味しているかが(学習者に)伝わらない。「モルは…の集団」の表現では、記述における包含関係に完全に無頓着だといえる。SI から解釈すれば、「モルは…の集団」は SI のモルの定義を改悪した、ともいえる。モルの定義として、SI の定める「モルは…の物質質量」を採用し、学習者にはさらに物質質量について別途の説明が必要になる。

世界共通の質量基準(現時点)は「キログラム原器」で、その質量に与えられた記号は、“1 kg”ではなくて“kg”である。この質量を基準にして、アボガドロ定数 N/mol が測定され報告されている。そこで、アボガドロ定数が十分な精度で測定できるようになれば、逆に、 N を定義値(厳密に)とすれば、「キログラム原器」は不要になる。この「キログラム原器」が不要となる流れを学習者に説明してから、次のような教材をかれらに提示してみよう。SI のモルの定義では、炭素原子 ^{12}C の 12 g 中に存在するその炭素原子数の測定数値が N であった。そこで「キログラム原器」に代わる質量の定義として、「0.012 キログラム(厳密に)は炭素原子 ^{12}C の数が N (定義値)である系の質量」あるいは「キログラムは炭素原子 ^{12}C の数が $N/0.012$ (定義値)である系の質量」を採用するとしよう。このときの定義値である N は、現在の各種の物理定数を大きく変動させないために、現在の測定値「 $6.02 \dots \times 10^{23}$ 」に近はずだ。この新しい定義から「の質量」を消去して、さらに「系」を「集団」に置き換えた、としよう。さて、結果表現に対して、学習者から「それではおかしい！」と反論がでるだろうか。この「キログラムとは…の集団」と同じことを、前出「モルは…の集団」でしているのは明らかだ。なお、上のように、質量を N (定義値)で定めると、モルも定義したことになる。モルの等価な定義はいろいろと考えられるが、例えば、「モルは要素粒子数が N (定義値)である系の物質質量」のような「モルは…系の物質質量」になるであろう。

初等的な科学教育において、多くの「思い違い」が知られている³²⁾が、以下の「モルは(個)数」説は典型例であろう。この説は、日本の化学教科書・化学啓蒙書で現在も次々と発表利用されて⁴⁻¹⁹⁾いるので、教材としての利用に事欠かない。多くの先達が思い違えるのは、学習者にとってもよい教材に直面している場面なのだから、反面教師としてのこの説を化学教育に積極的に取り入れるとよい。まず、最近の出版物⁴⁻⁹⁾から「モルは(個)数」説を取り出し、学習者に示す。つまり、モルは原子や分子を 6.02×10^{23} 個集めた集団のことだ、と説明する。この「モルは…の集団」は既述したように中途半端な説明だが結局は、ダースのような「数を束ねた単位」(“counting unit”)だとの説明に落ち着く。日本では、多くの化学啓蒙書が採用している、モルの説明では次のようになる。「モルは(ダースのような)アボガドロ数のこと」である、という。あるいは「個」を付けることもある。板書では「はじめに」のように「 $1 \text{ mol} = N$ 」と「 $1 \text{ mol} = N$ 個」と「 $1 \text{ doz} = 12$ 」とを上下に並べるとよい。こうすると、学習者は「よくわかった、モルは要するに、数あるいは個数のことだな」とうなずくであろう。次に、学習者に、SI の単位について思い出させる。ここで学習者に質問してみる。「モルは N 個、つまり、数(すう、あるいは個数)そのものだった。数(あるいは、個数)が SI の単位だなんておかしくないか?」と。この質問への回答で、長さや体積などの物理量やそれらの測定原理などを、学習者がどれくらい理解している(教師がどれくらい教えてきた)か、がわかる。かれらが「おかしい」と思うならば物理量について理解していることになるし、「変だ」と思わないならば物理量について理解が不十分だということになる。ここで注意するが「モルは(個)数」説には、以上の「数を束ねた単位」説の他に、日本独自の「個数は物理量」あるいは「 N

個は物理量」だとの主張も見かける。

モルは「ダースのような数を束ねた単位」説では例えば、要素粒子が N 個あれば 1 mol と置き換えて、 $2N$ 個あれば 2 mol と記号を付ける。この説では、モルは記法上は完璧に正しく見える。次のように、グラムという単位を教えるとする。「天秤で物体のグラムを決めよう。物体がグラム分銅二つと釣り合えば、物体は 2 g と書く。もし、グラム分銅三つと釣り合えば、 3 g と書く。」この操作を習えば、学習者はグラムを「正しく」表記できるようになる。ここまでの両者、モルとグラム、の問題点は共通する。どちらも記された結果からは、物理量としての単位の理解が根本的に欠けているか否かは、不明である。学習者が「数値×単位」を正しく表記していても、内容を正しく理解しているとは限らないこと、に注意しよう。学習結果の「みかけ」と「中身」は大違いかもしれないのである。

科学教育においては、物理量と単位とは極めて重要な事項である。物理量としての単位そのものの認識は自然を定量的に理解する出発点であり、自然現象は物理量を用いて解析され法則化されるからである。したがって、物理量と単位との学習プログラムは学習者に、科学の入門時から周到に準備した後、展開されなければならない。物理量や単位はアルファベット記号を用いて記されることが多く、それ故に、記号の使い方（使われた結果の表示）だけからは理解の正否（学習者が物理量や単位の意味内容をどれほど理解して利用しているか）は不明である。例えば、酸素分子 O_2 の数が $2 \times N$ である系の気体状態方程式を書き下してみる。圧力 p , 体積 V , 温度 T , として「 $p \times V/RT =$ 」の右辺は「数を束ねた単位」説に立っても、 2 mol とするであろう。そこでは、数 $2 \times N$ を 2 mol と置き換えている。モルを「数を束ねた単位」と解釈しても、結果の記号表示は（みかけは全く）変わらない。物理量指導においては、記号表記が「思い違い」をそのまま覆い隠すので、要注意なのである。式「 $1 \text{ mol} = N$ 」では、その左辺は物理量であり、右辺は数なので、次元が合わない。この右辺の正しい表し方も、モルの教材化には必須となる。

高校化学教科書や参考書¹⁴⁾で物質量の説明文を探してみる。例えば「モルを単位として原子、分子、イオンなどの量を表したものを物質量」と説明する。つまり、モルを先に与えて、次に、物質量はそのモルを単位にして表される「量」と述べている。この文脈は、物質量を n とし、測定された数値を a と表せば、次の式になる。

$$n = a \times \text{mol}$$

この式で、左辺を「質量」とし、右辺の単位をキログラムとしてみよう。その結果は、質量そのものを説明しているのではなくて、質量の測り方を述べているにすぎない（ある質量を測定するには、キログラムという単位を使って、この単位の何倍かを知る）のだと、わかる。物質量についての教科書の説明文が「わかったようなわからないような」はずである。その文脈では、物質量そのものを説明していなくて、物質量の測定の仕方を述べているだけなのだから。要するに、物質量とはモルを使って測定される「量」という説明スタイルは、物質量の説明には使えないのであった。

物質量と質量とは別の次元であることを示す教材には、化学では完全に廃棄されている「グラム分子¹⁵⁾」を使うとよい。現在のモルは、SI として 1971 年に定められたが、それ以前のモルは「原子量や分子量にグラムを付けた量」であった。この古いモルは質量の次元に属して

いたのである。グラム分子は、すでに歴史的な遺物になったはずだが、現在も使われたりしている。現在の記号²⁾を使って、グラム分子を数式風に表示してみる。

$$1 \text{ mol} = A_r(\text{B}) \text{ g}$$

例えば、水の要素粒子として H_2O を選ぶと、 $A_r(\text{H}_2\text{O})$ は 18 に (ほぼ) 等しいので、18 g のことを 1 mol とよんだ。そこで、正しくない例として「1 mol = 18 g (水では)」と板書する。あるいは、最近の受験参考書などに見かける式「モル = 質量 / 分子量」風に考えると「32 g の水は何モルか」には、水の分子量 18 で割算すれば、数値 2 を得るので、2 mol と (単位の記号 mol を添えて) 答える。どの化学教科書でも説明しているように、要素粒子 B からなる化学物質は $A_r(\text{B}) \text{ g}$ もってくれば、その物質質量は確かに 1 mol となる。しかし、現在では上の式は間違っている。なぜならば、単位に係る国際文書では、物質質量は質量とは別の次元とされているからだ。そこで、次のようにも質問してみよう。「水の 18 g は 18 mL だから (と、両者を等号で結ぶ式を板書して、学習者に) どこかおかしいところはないか?」と。学習者から疑問が出ないならば、日頃の科学計算で次元の違いを指導していない、と思われる。

アボガドロ定数 $N_A (= N \text{ mol}^{-1})$ は、学習教材として様々に使える。数値 $N (= 6.02 \dots \times 10^{23})$ をアボガドロ数とよぶ文献も見かける。アボガドロ定数は物理定数の一種であり、物理定数は物理量 (の一種) である。一方、 N は (測定された) 数値であるから、物理量とは完全に区別して議論しなくてはならない。ここで、学習者にはフレーズ「物理量は数値と単位との積」を思い起こさせる。物理量 N_A を単位「 mol^{-1} 」で測定すると、数値 N が得られる。

アボガドロ定数の単位は「 mol^{-1} 」や「 $1/\text{mol}$ 」で (分子割る分母の) 分子に単位がない。なぜか、という質問を生徒から受けることがあるかもしれない。個数に相当する単位、例えば「個」など、分子に本来は (個/mol のように) 入るのだが、英語圏では「個」を使わないので、などと解説 (教師用指導書など) されることもある。この解説は、モルを個数 (あるいは、数) の単位と考え、さらに、個数を物理量の単位とみなしている (ような) ので、間違っている。既に述べたことを繰り返す。ある系を構成する要素粒子 B の数を $x(\text{B})$ とする。この系の総質量は無論、 $x(\text{B})$ と要素粒子 B ひと粒の質量 $m_a(\text{B})$ とを掛算すると求められる。同じように、この系の総物質質量は、要素粒子 B ひと粒の物質質量を n_a とすれば、 $x(\text{B})$ と n_a の積に等しい。物理量 n_a の逆がアボガドロ定数 N_A とよばれる物理量である。逆を取ったので、当然のことながら、アボガドロ定数の単位は「 mol^{-1} 」となる。要素粒子ひと粒の質量 $m_a(\text{B})$ を逆にすれば、その分子に単位がなくなるのと同じである。ここまでの議論で「個」を使っていないことを確かめよう。物質質量の単位に関連して、漢字の「個」を使う人たちが「個」という単位を理解できて、英語圏の人たちにはできない (使わない) なんて、あるはずがない。「個」は完全に不要なのである。では、物理学と化学ではなぜ、要素粒子ひと粒の物質質量ではなくて、アボガドロ定数を使ってきたのであろうか。単に歴史的な理由からだと思われる。

「アボガドロ数 $N (= 6.02 \times 10^{23})$ が膨大なので、モルの理解は難しい」とも聞く。けれども、モルを使って物質質量を測定するとき、この N を使わない。「目に見えるもの (長さや質量など) なのでやさしい。目に見えない (物質質量や電圧など) ので難しい」とも聞く。質量の場合、分銅 (の質量) を化学物質 (の質量) と天秤で比較することで、測定する。つまり、生徒は質量の測定では、物理量の比較の方法を知っている。物質質量の場合、比較の方法がわかれば、質量

と同じ（測定できるという）水準で理解したということになる。しかしながら、質量を天秤で測定できたからといって、質量に関与する物質の特性（前出）を理解できたのではない。肉眼で見えるものは理解しやすい、のではない。わかった気になっている、あるいは、慣れている、にすぎないのである。原子や分子が極めて小さい（数が膨大な）ので、（大きな数を）人が扱いたやすくするため、モルという単位を考えた、とも聞く。この考え方では、物質量は「数」あるいは「個数」のこと、を前提としているようだ。天秤で化学物質の質量を測定したら、膨大な数の原子や分子を扱ったことになるが、キログラムという単位を（膨大な数をもとに）考えたわけではない。

物質量の測定法を教えるには、モル電子天秤（モル気体ビュレット、モルシリンダ）の文献¹⁹⁾を学習者に与えて検討させるとよい。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）とモル質量の一覧表を用意しておく。まず、物質の質量を測定し、物質の種類を入力する。次に、モル質量の一覧表を用いて物質量を計算し、その結果を表示する。ここで、学習者に「物質量は正しく測定できているかな？」と問う。かれらの反応がかんばしくなかったならば、さらに、次のように質問してみよう。密度が既知の物質が与えられているとする。今、この物質の質量を測定したとすると、その物質の体積は、質量を密度で割算すれば、知れる。さて、この質量測定実験で、物質の体積を「直接的に」測定した、といえるか、と。この質量測定で、体積の測定をした、とはいえない。体積の測定は、既に（別の誰かが）密度の測定時に済ませているからである。物質量は例えば、質量とモル質量、体積とモル体積、体積とモル濃度、など2種類の物理量の割算で表される。質量とモル質量の場合、物質の質量を天秤で測定し、モル質量を既知として、物質の質量をモル質量で割算すれば、その物質の物質量が求められる。学習者はモル電子天秤の測定では、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。物質量の測定法の授業では、測定原理（要素粒子間の一対一対応）こそ、教授すべきエッセンスなのである。中和反応（化学量論式）の例では、酸塩基の要素粒子が化学反応によって一対一対応していたことを思い出そう。

註 と 文 献

- 1) 国際単位系 (SI) とモルやメートルの定義など、和訳用語「物質量」「モル」「要素粒子」などは次の文献による。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. なお、以下の Mills 他の翻訳書も参照のこと。
- 2) 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。英文初版 1988, p. 4 の "The physical quantity *amount of substance* is of special importance to chemists." の '*amount of substance*' の次に、英文2版では "or *chemical amount*" が挿入されている。要素粒子の指定は上記和訳書の pp. 42-44 を参照のこと。

- 3) 日本化学会の推奨する「化学で使われる量・単位・記号」は『化学と工業 (2004, 6月)』誌に挿入されている。そこでは「7個の基本物理量」とか「7個の基本単位」とか使われているが、どうして「7種類の基本物理量」とか「基本単位は7種」などといわないのだろうか? 引用5公文書(1999)では、「七つの単位」と翻訳されている(p.10)し、初期のグリーンブック訳(関集三・松尾隆祐, 昭和48年4月, p.2)では「七つの物理量」となっていた。「個」は「手に取ることのできない抽象的なもの・概念的なものを数え(飯田朝子『数え方の辞典』小学館, 2004, p.346)」るとされるが、「ひとつ」「ふたつ」などの接尾語「つ」が、物理量や単位では「個」よりもはるかに自然ではなからうか。果物が「りんご」と「みかん」ならば「二種」あるいは「二種類」であって「二個」ではないはず。
- 4) 数研出版編集部『フォトサイエンス化学図録』(数研出版, 2004, 第8刷, p.37)では「原子や分子などの粒子を 6.0×10^{23} 個集めた集団を1モルという。モルという単位で表される原子や分子などの粒子の量を物質」という。典型的な「モルは…集団」の説明文である。
- 5) 大川貴史『高校化学とっておき勉強法「なぜそうなるのか?」がわかる本』(講談社ブルーバックス B-1356, 2004, 第4刷)では「質量数12の炭素原子0.012 kg中に含まれる炭素原子の数を、1単位として扱い、それだけの個数集まった物質の量を“1 mol”という(p.268)」「ややこしければ、しばらくはモルを個と置き換えればよい(p.270)」とある。
- 6) 斉藤勝裕『絶対わかる化学の基礎知識』(講談社サイエンティフィック, 2004)では「原子、分子を扱う際の単位をモルという…アボガドロ数個の分子、原子をまとめて1 molの分子、1 molの原子という…化学ではこのダースに相当する単位としてモルを使う(p.8)」とある。
- 7) 和田純夫・大上雅史・根本和昭『単位がわかると物理がわかる: SI単位系の成り立ちから自然単位系まで』(ベレ出版, 2004, 第6刷)には「モルは物質として定義されていますが、その定義からわかるように結局は個数です。しかも、12 g中に含まれている原子数です(p.42)」とある。SIでのモルの定義では、「モルは…系の物質」と定めているだけなのに、なぜ「モルは個数」となってしまうのだろうか?
- 8) 竹内敬人ほか編著『ダイナミックワイド 図説化学』(東京書籍, 2003, p.41)では「 6.0×10^{23} 個の粒子集団を1 molといい、モルを単位として表す量を物質」という「 6.0×10^{23} 個 = 1 mol」「モルは…12個を1ダース…などと表すと似ている」とされる。
- 9) 大宮理『化学「理論化学編」が面白いほどわかる本』(中経出版, 2003)では「アボガドロ数個まとめたものを mol という単位を使って1 mol っていうんだ。この mol で数えた量を物質」という(p.32)」「1 mol = アボガドロ数個の粒子の集まり(p.33)」「粒子数(個) = (モル数) × (アボガドロ数)(p.35)」とある。
- 10) 坪村宏「改めたい化学用語」(化学と教育, 47(11), 782-783, 1999)では、物質は「物質の中の原子、分子などの数をアボガドロ数単位(モル)で表したもの」を受け入れているようだ。この表現は註25の議論(啓林館本)を参照すれば、明らかに「モルあるいは物質を“counting unit”」と解釈する立場である。氏は結論として「物質という用語は不要であり、すべて“ある物質A(原子、分子、化合物など)の量は X mol である」という風には書けば済む。そのほうが初心者にはわかりやすい」という。この主張は、物質という(物理量の)次元はない(あるいは、不要)と、いっているようだ。
- 11) 岩波理化学事典第5版1998では、物質は「アボガドロ定数に等しい数 ($6.022 \times$

- 10²³) を 1 単位として表される物質の量。(中略) 物質の量はそれをつくる単位粒子の個数で表わすことができる。しかし、単位粒子の数は一般的に極めて大きいので、モルを用いる」とされる。この文脈は「物質量は…物質の量」となっている。
- 12) インターネットで検索すると「モルは(個)数の単位」や「モルはダースと同じ」との説明が圧倒的に多い。例えば「黒木のなんでも掲示板 (0024)」(Id: #a19981023214122, Date: Fri Oct 23 1998 Subject: モル) で、小波秀雄氏いわく「現在の SI の規約では、物質量というのは常識的な意味での物質の量のことではなく、ある量の物質を粒子集団として数えたときの量です。(中略) 田崎さんの苦悶の一つの種は、数は単位ではないから mol という単位を m や kg と同格に扱うのはまずいということですね? それについては、同格に扱っちゃいなさいというのが SI の精神なんでしょう」と。
- 13) 長倉三郎・竹内敬人他『化学 I B』東京書籍, 1993 などでは「原子分子イオンなどの粒子のアボガドロ数個の集団を 1 モルとし、モルを単位として測った物質の量を物質量という」とある。
- 14) 高田誠二『単位と単位系』(物理学 One Point 8, 共立出版, 1980, pp. 28-31) では物質量は、分子や原子やイオンなどを N 個ずつで束をつくり、束がいくつあるかを調べて得られる量、という。典型的な「モルは数を束ねた単位」説である。
- 15) モルは「(ダースのような) 粒子の(個)数(数を束ねた単位)のこと」という解釈が、日本の化学教育界・化学界でなぜかくも広範囲に受け入れられているか、は興味深い。化学に関わる概念が、どのように受け入れられ(あるいは、変形され、あるいは、拒絶され)てきたかは、化学教育にも関連するテーマである。海外の、特にアメリカ(合衆国)とイギリスの、モルをめぐる歴史は日本でも大いに参考になるはずだ。本稿に遡る一連の授業研究(以下の註 20-57)で述べてきたこと感じたことを、海外事情との関連で簡単に要約してみる。Guggenheim が 1961 年に現在の SI の定義の原形を発表(*Journal of Chemical Education*, **38**(2), 86-87)した。この雑誌は、世界の化学教育界でフラッグシップ(旗艦)とよばれている。Kieffer は早々とその文献を引用しながら「モルはアボガドロ数のこと」だと著書(*The Mole*, 1964)で述べている。モルは「数を束ねた単位("counting unit")」説は英語圏では、1960 年代に早くも現れたのである。SI のモルが 1971 年に定められてからは、化学者と化学教育者を巻き込んでさらに混乱したようだ。イギリスでも、モルを式「 $1 \text{ mol} = 6.02 \times 10^{23}$ 」のように、「数を束ねた単位」説(モルはダースのようなもの)が現れ、それに対して McGlashan (1977) が雑誌 *Education in Chemistry* などで「モルは(数ではなくて)物理量だ」と訂正している。この雑誌には「Letters to the Editor」欄で相互に批判しあう伝統がある。この雑誌ではすぐに決着がついて、それ以後、イギリスでは「数を束ねた単位」説は影を潜めているようだ。一方、アメリカでの「数を束ねた単位」説は、単行本(例えば、大木道則訳『パリー・新ケムス化学』(1973)や雑誌(例えば、D. Kolb, *J. Chem. Educ.*, **55**(11), 728-732, 1978)で続いたが、この雑誌では、G. Gorin (*J. Chem. Educ.*, **71**(2), 114-116, 1994; **80**(1), 103-104, 2003)や R. D. Freeman (*J. Chem. Educ.*, **80**(1), 16-21, 2003)の論文をみると、決着がついているようだ。ただ、アメリカでは、L. J. Malone, "Basic Concepts of Chemistry," 第 7 版(2004)や、A Project of the American Chemical Society, "Chemistry," W. H. Freeman and Company, New York (2005)では、「数を束ねた単位」説を採用している。後者では、"one mole is defined to be the number of atoms in exactly 12 g of carbon-12 (p. 47)"で、モルは数そのものとして定義されている。日本唯一の全国的な化学教育雑誌『化学と

教育』では、連載講座「単位のはなし」(廣田 穰, 34(2), 138-141, 1986)の説明が典型的で「モルは(ダースのような)単位」とされた。現在(石井菊次郎, 化学と教育, 50(4), 333-334, 2002)も「モルは粒子の(個)数のこと」とされ、アメリカの「数を束ねた単位」説の影響が続いているようだ。McGlashanの著書「SI単位と物理・化学量」が翻訳出版(化学同人, 1974)されているから、「モルは数ではないこと」は日本に入っている。本書を読めば「モルは(個)数」説が「思い違い」とわかる。

- 16) 文部省『高等学校学習指導要領解説 理科編・理数編』昭和54年(1979)では『物質質量』については、物質の量を表す単位として、構成粒子(原子・分子・イオン)の数で示すもの、すなわち『モル』を導入する」とある。つまり、モルは数そのものである、という。ところが、平成11年(1999)版では『物質質量』については、物質の量を示す概念として、物質質量とその単位の『モル』を導入し」として、物質質量そのものの説明は省かれている。ここでいう「物質の量」の「量」は、物理量、数、ほんやりとした量一般など、どれを意味しているのだろうか? 日本国計量法でいう「量」は、物理量やその他の測定可能な量を広く指しているから、それなりに意味が通じる。しかし、計量法から一部取り出して、「物質の量」というと、極めてあいまいになってしまう。「物質質量は…物質の量」というあいまいな表現が、中等教育関係の文献に堂々と流布している典拠はこの解説書かもしれない。
- 17) 「科学」についての説明は『小学校学習指導要領解説 理科編』平成11年(1999)にある。理科の目標について説明されている部分で「現在、科学の理論や法則についての考え方が、次に述べるように変化してきているといわれている。それは、科学の理論や法則は科学者という人間と無関係に成立する、絶対的・普遍的なものであるという考え方から、科学の理論や法則は科学者という人間が創造したものであるという考え方に転換してきているということである。この考え方によれば、科学はその時代に生きた科学者という人間が公認し共有したものであるということになる」という。この説明文では「いわれている」と一般的に認知されているかのようなスタイルをとりながら、実は、自然的事実と人間に依る認識とを、意識的に、混同しているように見える。こういう「科学」の説明の背景には、日本における理科教育は自然科学教育ではない、ことがあるのではなからうか。「解説」にこのような主張がみられることは、驚くべきことだ。
- 18) 泉 邦彦『化学のことば』(講談社サイエンティフィク, 1983, 第2刷 1985, pp. 30-31)には「同じ個数の原子や分子を含む物質の質量を、とりあつかいやすいスケールで表すために考案されたのがモルであり、原子量、分子量または式量の数値にグラム(g)をつけた量が1モル(mol)」とある。グラム分子の典型的な説明文である。
- 19) 松原静郎・保坂純三・石川朝洋・久保博義・堀 哲夫・寺谷徹介「高等学校化学学習における物質質量を直接測定する機器導入の意義—モル電子天秤の導入をめぐる—」(化学と教育, 43(6), 395-398, 1995)とその引用など。
(物理量をめぐる化学教育研究(授業研究)一覽)
- 20) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Teaching the Unit 'Radian' as a Physical Quantity," *KHIMIYA: Bulgarian Journal of Chemical Education* (ISSN 0861-9255), 14, 投稿中(The Ministry of Education and Science, Bulgaria, 2005) .
- 21) 森川鐵朗・澤田和弘「科学教育における『記述論理』と物質に関する『巨視的概念』の形成について」(上越教育大学研究紀要, 24(2), 459-469, 2005).
- 22) T. Morikawa and B. T. Newbold, "'Amount of Substance' and a Single Elementary

- Entity," *KHIMIYA*, **13**(6), 431-435 (Bulgaria, 2004).
- 23) 森川鐵朗・成田 進「物理化学教育における化学数理 — 分布と誤差 — について」(上越教育大学研究紀要, **24**(1), 183-198, 2004) .
- 24) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Chemical Amount: A Difficult Concept and its Avogadro-like Understanding," *Chem NZ*, **95**, 14-18 (The New Zealand Institute of Chemistry, New Zealand, 2004).
- 25) 森川鐵朗・榎田豪利「物質質量とモルに関する教具 — 開発と利用 — の研究」(上越教育大学研究紀要, **23**(2), 691-703, 2004).
- 26) 森川鐵朗・広瀬庄一「化学量論に基づく物質質量の指導法とその学習過程における高校生の理解の分析」(科学教育研究, **28**(3), 188-196, 2004).
- 27) 森川鐵朗・榎田豪利「物質質量とモルの指導案 — 考え方と授業実践 — の研究」(上越教育大学研究紀要, **23**(1), 245-260, 2003).
- 28) 森川鐵朗・榎田豪利「物質質量とモルの授業計画 — 方法と展開 — について」(前掲, **22**(2), 637-651, 2003).
- 29) 森川鐵朗「物質質量とモルは物理量であるについて」(化学と教育, **51**(2), 142-143, 2003).
- 30) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Teaching Specification of Elementary Entities in Amount of Substance and the Mole," *KHIMIYA*, **12**(2), 107-110 (Bulgaria, 2003).
- 31) 榎田豪利・森川鐵朗「電流とイオン流との中の『類推』の実験学習」(化学と教育, **51**(9), 569-570, 2003).
- 32) 森川鐵朗・榊原正明「科学の学習過程にみられる『思い違い』—教師教育のための分析と教材化」(上越教育大学研究紀要, **22**(1), 1-10, 2002).
- 33) 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* (ISSN 1445-9698), **59**, 17-19 (The Royal Australian Chemical Institute, Australia, 2002).
- 34) 森川鐵朗・田口 哲「化学電池を教材とするエントロピーとギブスエネルギーと熱力学的可逆過程の導入法について」(上越教育大学研究紀要, **21**(2), 431-442, 2002).
- 35) T. Morikawa, "Why Do Chemists Need Amount of Substance and the Mole," *CHEM NZ*, **87**, 10-13 (New Zealand, 2002).
- 36) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Teaching of the Principles for Handling Physical Quantities in Chemistry Education," *KHIMIYA*, **11**(6), 453-458 (Bulgaria, 2002).
- 37) B. E. Williamson and T. Morikawa, "A Chemically Relevant Model for Teaching the Second Law of Thermodynamics," *Journal of Chemical Education*, **79**(3), 339-342 (The American Chemical Society, USA, 2002).
- 38) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Step-by-step Identification for Teaching the Concept of Chemical Substance," *KHIMIYA*, **10**(6), 383-388 (Bulgaria, 2001).
- 39) T. Morikawa and B. E. Williamson, "Model for Teaching about Electrical Neutrality in Electrolyte Solutions," *Journal of Chemical Education*, **78** (7), 934-936 (2001).
- 40) 森川鐵朗・一色健司「科学教育における物理量の処理方法とモル演習の方略について」(上越教育大学研究紀要, **21**(1), 343-358, 2001).
- 41) 森川鐵朗・伊藤眞人「物理量は数値と単位との積について」(化学と教育, **49**(8),

- 523-524, 2001).
- 42) 森川鐵朗・田口 哲「モルの次元の教材化と物質量の釣り合いについて」(上越教育大学研究紀要, **20**(2), 535-548, 2001).
 - 43) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Teaching Ratio, Proportion and Continued-Proportion between Physical Quantities," *ibid.*, **20**(1), 1-6 (2000).
 - 44) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Coherent Processing of Statements and Symbolic Equations for Teaching Conservation of Energy," *KHIMIYA*, **9**(5-6), 309-313 (Bulgaria, 2000).
 - 45) 森川鐵朗・林 讓「化学教育における平衡をめぐる理解と誤解について」(上越教育大学研究紀要, **19**(2), 461-471, 2000).
 - 46) 広瀬庄一・森川鐵朗「化学教育における物質量の測定法と生徒の学習上のつまづきについて」(化学と教育, **48**(11), 752-755, 2000).
 - 47) T. Morikawa and B. T. Newbold, "A Listing and Equating Method for Solving Chemistry/Physics Problems," 上越教育大学研究紀要, **18**(2), 667-672 (1999).
 - 48) T. Morikawa and B. T. Newbold, "Inclusion-Exclusion Diagrams for Teaching Properties of Physical Quantities," *Chem NZ*, **77**, 21-23 (New Zealand, 1999).
 - 49) 森川鐵朗・室谷利夫「中等物理化学教育における物理量の表現とその導入法について」(上越教育大学研究紀要, **19**(1), 67-81, 1999).
 - 50) T. Morikawa and B. T. Newbold, "A Tool for Teaching Amount of Substance as a Physical Quantity," *KHIMIYA*, **8**(5-6), 285-290 (Bulgaria, 1999).
 - 51) 森川鐵朗・田口 哲「熱力学的物理量としての温度の導入法について」(上越教育大学研究紀要, **18**(1), 285-299, 1998).
 - 52) 森川鐵朗・下村博志「エネルギーの物理化学的諸性質と導入時の問題点」(前掲, **17**(2), 855-865, 1998).
 - 53) 黎 子椰・森川鐵朗「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), 採録番号 2-23, 1998).
 - 54) 森川鐵朗・西山保子「科学教育における量の計算法について」(上越教育大学研究紀要, **17**(1), 365-375, 1997).
 - 55) 森川鐵朗・西山保子「物理量としての単位モルの導入法について」(前掲, **16**(2), 651-659, 1997).
 - 56) 森川鐵朗・西山保子「初等中等科学教育における物理量と単位系について」(前掲, **16**(1), 279-288, 1996).
 - 57) 森川鐵朗「初等化学教育における原子・分子説についての一考察 ——その導入時の問題点」(前掲, **7**(3), 93-99, 1988).

Misconceiving 'Chemical Amount' and the Mole

— An Analysis and a Teaching Material for Teacher Education —

Tetsuo MORIKAWA *

(Received April 25, 2005; accepted June 6, 2005)

ABSTRACT

A series of practice studies in this university journal has clarified some of the misconceiving of 'chemical amount' and the mole in the school chemistry course of Japan. This paper presents a teaching material to cope positively with such misconceptions for teacher education. Such materialization is effective for training science teachers and learners to become persons able to handle science confidently.

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