

物質量とモルに関する教具—開発と利用—の研究

森川 鐵朗*・榎田 豪利**
(平成15年10月14日受付;平成15年12月1日受理)

要 旨

前報(23巻1号)では,高校化学における物質量とモルの指導案を検討した。本論文では,この指導案をもとに,授業実践をするための教具を研究する。第1節では,物質量に関する教具の考え方と開発法について考察する。第2節では,生徒が手作りするモデル実験「豆世界」を提案する。この製作実験では「小豆」と「いんげん豆」を化学物質に見立てる。物質量とモルに関する教具は,物質の「つぶ構造」を学習者に意識させるものでなくてはならない。

KEY WORDS

teaching tools	教具
models and modeling	模型と製作
corpuscular concept (granularity) of matter	物質のつぶ概念(粒子性)
Avogadro-like understanding	アボガドロ的理解
chemical amount (or 'amount of substance')	物質量
specification	(要素粒子の)指定
mole concept	モル概念
development	開発
beans	豆
science education	科学教育

1 物質量に関する教具の考え方と開発について

教具は教材学習を助けるものである。そこで,教具を製作する際には,その元となる教材の(生徒に伝えるべき)主題のどこを助けるのかを,まず明らかにしなければならない。物質量に関する教具でいえば,物質量はどのような物理的内容なのか,生徒が理解するべき点,を明確にしなければならない。前々報¹⁾では,物質量は要素粒子の種類が違っても「ひとつぶでは同じ量とみなす」と,定めた。要素粒子から出発し学習する指導上の留意点は,前報²⁾で検討した。以下では,要素粒子BやCひとつの物質量を $n_a(B)$ や $n_a(C)$ と記す。物質量とモルに関する本授業研究では,教具の考え方の基本として,物質量バランス式「 $n_a(B)=n_a(C)$ 」を採用し,化学物質の特性としての「粒子性」を生徒に理解させようと試みる。

* 上越教育大学自然系教育講座 〒943-8512 上越市山屋敷町1

** 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

前々報では「物質量の考え方のエッセンスは要素粒子を、原子や分子の個別の物理的な性質（の一部）の違いを超えて、つぶとみなすこと」と述べた。さらに、生徒用「学習シート」では、化学物質の巨視的（熱力学的）世界で、質量 m と体積 V に次ぐ第3の物理量として、物質質量 n を導入し、この物質量は「化学物質の世界と極微の世界とをつなぐ量」とも述べた。このように、物質 matter には、三種類の特性が知られている。物質の特性³⁾ は、まずは3次元的な空間的広がりであり、さらに、慣性・重力であり、関与する物理量はそれぞれ、体積と質量である。体積は人類の歴史が霞むほど古くから知られていた。他方、慣性・重力はガリレイとニュートンの時代に法則として立てられたことは、科学史の教えるところである。物質の第3の特性が粒子性、つまり、物質（と物質を構成する化学物質 chemical substance）のつぶ構造⁴⁾ であり、物質量はこの粒子性を示す物理量であった。物質量の単位（モル）は、化学者によって十九世紀末には使われだして、含意は変遷しながらも、二十世紀70年代に国際単位系 SI に組み込まれた。物質量は物質の第3の特性に関与する物理量だから、その単位が SI の7基本単位の一つとして採用されても、むべなるかなと思える。物質量は、化学者が単に便利だから使っているというものではないのである。物質量に関する教具の製作では「つぶ」を常に意識していなければならない。

モルの授業に係る教具の提案は極めて多い。それらのほとんどは、「モルは原子や分子の個数を表す（ダースのような単位）」という解釈⁵⁾ に基づいている。そこで、教具としての工夫は「数を束ねる単位」を生徒に如何に理解させるか、に集中する。モルの理解の困難性は、例えば「数が膨大」であることだとして、教具を利用して「数が膨大」を乗り越えようとする。物質に関する「つぶ構造」の認識不足が、モルを「粒子の（個）数のこと」と誤解したり「手強い」と感じたりする根源的な要因であろうか。他方、物質量そのものに関する教具は乏しい。SI では「モルは…系の物質量」と定義⁶⁾ されているが、物質量（長さや質量なども同じく）そのものの説明はみあたらない。IUPACの文書⁷⁾ にみられる「ある物質の物質量はその物質の指定された要素粒子の数に比例」し「その比例係数はすべての物質で等しく、その係数の逆数はアボガドロ定数である」が、公的機関による唯一の説明と思われる。この説明文は、フレーズ「物理量は数値と単位との積」の物質量版（註5参照）なので、高校化学（生徒）にとっては不十分である。物質量そのものの理解を助け（つぶ構造をハッキリと意識してい）る教具の開発が待たれている。

物質量を教える最良の高校化学教材を三種類あげる^{1,2)} と無論、化学変化（化学反応式、正確には化学量論式、以下同じ）と化学物質（分子式など）と（希薄な溶液や気体に関する）古典的物理化学現象とである。これら三種類を定量的に扱うときに、物質量が必要となるのだから、これらの化学教材の理解と物質量の理解は表裏一体である。すなわち、中等化学教育課程では、これらの教材を取り上げる度に、物質量の学習を段々と深めていくのがよい。

希薄溶液の凝固点降下度（温度変化 ΔT ）は、溶媒が与えられると、比例式 $\Delta T \propto c$ （モル濃度）で表される。この法則は溶質の種類に依存しないのだから、溶質（化学種）を B と C とすれば、 $n_a(B)$ と $n_a(C)$ とが等しい、と強く示唆している。逆に、微視的な物質量バランス式「 $n_a(B) = n_a(C)$ 」が、束一的性質 colligative property の根拠だ、ともいえる。気体は同温同圧（十分に希薄）では、 $V \propto n$ （アボガドロの法則）に従う。この法則は気体の種類が違ってても同物質量では同体積だというのだから、例えば気体水素と気体酸素とを選べば、 $n_a(H_2)$ と $n_a(O_2)$ とが等しいことを示唆する。まさに「つぶ」の性質である。このように、化学物質の

種類に依らないという「つぶ構造」をはっきりとつかまえる理解（認識）は、アボガドロ的とよべるであろう。ここまでの二種の法則では左右の辺を（数や個数ではなくて）物理量で釣り合わせている²⁾ことに注意しよう。次節では「小豆」と「いんげん豆」を原子・分子に見立て、 n （小豆）と n （いんげん豆）が等しい、と（生徒に）体験させる教具を製作している。このように、物質質量を釣り合わせることで、物質の「つぶ構造」をハッキリと主張すること、つまり、学習者を物質のアボガドロ的理解にまで引き上げること、が物質質量学習の要である。

物質質量は物理量であるので、どの物理量についてもいえる注意も必要であろう。体積は典型的な物理量であるが、この体積を使うときに、誰でも「物理量とは何か」をハッキリと理解してから使うわけではない。質量という物理量を縷々と説明しても、生徒にはなかなか（直ぐには）理解され（納得してくれ）ない。児童・生徒・学生は、直接的な感覚から出発し、経験（慣れ）を積み重ね、遂には感覚を離れて、極微（原子・分子）の世界の物理量を記号で扱えるようになる。物質質量の場合も、物理量だとの説明には強くはこだわらないのがよい。物質質量が体積・質量・数とは区別され（物理量の一つの次元であると）国際的に認知されたのは、他の物理量（長さや質量など）と比べると極めて新しい。モルは前述のようにわずか三十数年前にSIに組み込まれ、キログラムは1901年に定義され、国際メートル原器は1875年に作成されたのであった。したがって、体積と同じように時間をかけて慣れれば、生徒も物質質量を扱えるようになるかと期待し、あせってはならない。物質質量に係る教具は、物質質量に早く慣れるように生徒を助けるのである。

物質質量 n は、質量 m や体積 V などと同じく巨視的物理量ではあるが、それらとは別の学習上の困難もある。物質の m と V は感覚的に体験できるので、生徒には続けて微視的粒子の質量と体積を、類推によって納得させる。このとき、微視的粒子 B ひとつの質量 $m_a(B)$ とその体積を感覚的に体験しているのではない。他方、 n は、物質の「つぶ構造」という特性に由来する物理量なのだから当然だが、生徒自身で五官による体感ができないのである。物質質量の学習上のこの難しさは、化学物質の原子・分子の理解の場合と似ている。そこで、学習上の困難を克服するための次のような注意が要請される。第1は、原子・分子論を学ぶ出発点における注意⁴⁾でもある。物質は原子や分子で構成されていると理解する段階（後述のドルトンの理解）に留まっていたは、物質質量の学習に至っても記号処理を頭から覚えることになる。「学習シート」で述べた¹⁾ように、水が分解して気体水素と気体酸素が生成されるとき、物質の質量では約1対8の比になるのに、それとは別の2:1となる「量」があること、生徒に、このような化学体験⁵⁾がなければ、物質質量と個数との区別は観念的に終わってしまうであろう。教師側がドルトンの理解とアボガドロ的理解とを明確に区別しながら、生徒には、化学の実体験を通じて物質の「つぶ構造」の理解を促すのである。第2は、体感を離れても可能な、物理量の物理量たる所以を m や V などで、広く（物質質量の学習以前に）理解しておくことである。ここでの所以とは、既に強調した^{1,2)}ように、物理量の表現「物理量＝数値×単位」や物理量のバランス法などである。自然科学教育で扱う「量」が（学習者に）物理量として理解できていることは、これらの所以を理解していることにほかならないからである。

前々報の「学習シート」では、化学物質の化学式や化学物質間の化学変化を既知とし利用して、物質質量を説明した。逆に、物質質量を利用して、化学式（実験式）や化学反応式を決定できる。例えば、化学分析の計算例⁹⁾が示すように、化学実験に基づいて（与えられた有機物質中の元素の質量の割合から）物質質量バランス式を求めていけば、その有機物質の「実験式」が定

まる。分子イオンの分子量測定（質量分析法）によって分子式を定める場合も、モル質量 $M(B)$ は $A_r(B)g/mol$ に等しいとして、結局は物質質量を利用している。化学反応式についても同様で、反応物質と生成物質と間で、もし化学反応式が知られていれば、物質質量バランス式を書き下せるし、逆に、実験的に物質質量バランス式が得られると、化学反応式を書き下せる。次節では、モデル実験によって、この物質質量バランス式の立式法を練習する。現在の化学学習の教程では、物質質量以前に分子式や化学反応式を学ぶ。そこで、分子式や化学反応式を学習するときに、将来に物質質量を学習することを予定して準備しておくとうい。固体炭素と気体酸素から気体の二酸化炭素が生成されるとする。化学反応式では、 $C + O_2 \rightarrow$ などと書いたとき、原子と分子はひとつあるが、化学物質では要素粒子の集合体が「一対一対応」していること、と生徒に説明する。上記三種類の化学教材を理解するために工夫された教具は、そのままあるいは少し視点を変えるだけで、物質質量の学習のために利用できる。このように、物質質量学習の前準備とは、要素粒子と一対一対応を意識化することにある。以下では、化学変化の教材・教具を物質質量学習に利用するときに、どこに留意するべきかを検討する。

日本の学校教育の標準的な教程では、化学反応式¹⁰⁾は中等前期で、物質質量は中等後期で扱う。最初の化学反応式 (Lavoisier, 1789) は

ぶどうのしぼり汁 = 炭酸 + アルコール

とされて¹¹⁾ いる。この表現では、反応物と生成物の種類を指定し、それらの質量の割合をも暗示している。この段階はいわば、化学反応におけるラボアジェ的理解（認識）といえる。このとき、化学反応式中に化学記号を使っても、それは物質名そのものであり、物質名を化学記号で置き換えた水準であって、要素粒子としての認識までには至らない。したがって、物質質量の理解にはまだ遠い。

化学反応（式）をより深く理解するには、化学物質が原子・分子から構成されていることを意識化する。化学記号のもつ意味が、化学物質名から原子・分子個々の表現へと転換する。この段階は、化学反応におけるドルトンの理解（認識）Daltonian understanding とよべるであろう。化学反応式中の化学記号が物質名から、要素粒子に変わるのだから、化学反応式が要素粒子間の対応をも表現していることになる。水の分解反応では、要素粒子である $2H_2O$ と $2H_2$ と O_2 とが「一対一対応」していると捉える段階¹²⁾ である。化学反応式の学習では通常、要素粒子間の対応を生徒に喚起はしないが、物質質量学習の準備のためには、この「要素粒子と一対一対応」を生徒に強調しなければならない。物質質量の測定原理「一対一対応」を教える一つの教具として、すでに「粒子シート」を提案⁸⁾ してある。次節のモデル実験では、豆を教具として使い「一対一対応」を学ぶ。

物質質量を「要素粒子の種類が違って同じ」と感じさせる化学反応教材は、中和反応がよい¹⁾ であろう。酸の水溶液と塩基の水溶液では、酸・塩基の要素粒子 HCl と $NaOH$ （さらに、 H^+ と OH^- でもよい）の物質質量の釣り合いで（濃度ではなくて）考えられることが要点である。このときの教具では、「学習シート」で採用した、ボールペンとキャップの例のように、対となる（生徒が対だと思える）ものを利用する。対であれば、同じ量であると感覚的に考えやすいからである。中和する酸・塩基の化学実験値を用いるとき、質量ではバランス式を描けないが、物質質量ではきれいに釣り合うことを示し、物質質量の有用性を説明してもよい。物質質量

でデータを整理しなければ、反応式は出てこないし、何をしているか、見通しが立たない。次いでより一般的には、気体水素 H_2 と臭素 Br_2 の反応のように、反応式中で対となる物質間でも、より抽象的な「対応」によって、同じ量 $n(H_2) = n(Br_2)$ と認めることが次の段階となる。どの要素粒子も「ひとつでは同じ量」と認める段階だから、アボガドロの理解（認識）とよべるであろう。物質質量の理解と分子式や反応式の定量的理解は表裏一体であるという前述の注意をくり返す。化学の実際の授業では生徒に、分子式も反応式も覚えさせて、流れをつくっていく。ほんとうは、物質質量を使わなければ、ある物質の分子式がなぜそのようになるか（原子数は）化学実験からは不明である。普通の授業では、物質質量からは入らない。つまり、分子式も反応式も、物質の名前のように頭越しに（生徒に）覚えさせる。そこで、物質質量を学習した後で、物質質量を使って分子式や反応式を改めて考え直すことになる。化学物質（分子式など）や化学変化（反応式）の理解には、ラボアジエ的、ドルトンの、アボガドロ的とあり、学習者はこの最後の段階⁴⁾に到り、物質質量概念を受容できるのである。物質質量の理解の困難性は、ドルトンのとアボガドロ的との区別にあるのかもしれない。

教材の抽象性を具体物によって、生徒の目の前で、見えるがごとく思い浮かべさせること（可視化）も教具の役割¹³⁾である。例えば「化学物質の要素粒子を一対一対応させて」と述べただけでは、この「一対一対応」は、初めての生徒には思い浮かべにくいかもしれない。そこで、要素粒子を表す化学記号を「粒子シート」のごとく並べる。さらに、化学記号ではまだ抽象的だと思われるときには、磁石を分子に見立てて、黒板上で対応を示したり、さらに、紙片に化学記号を書き込み切り分けて、対応を手作業で体感させる。ここでは数学的な関係である「一対一対応」を「可視化」している。机の幅は、メートル尺（物差）を机の表に「あてて」測定して、「あてる」という測定法を学習する。そこで、モルの場合も「モル尺」を教具として「あてて」使うこともできる。どのような要素粒子Bでもよいが、 $A_r(B)g$ だけ用意したとする。例えば、 ^{12}C では12g（厳密に）である。これらの要素粒子を $N(=6.02 \times 10^{23})$ 粒、途中を点々にして、横一列に並べる。これがモル尺である。黒板に化学記号を並べてもよいが、磁石一つに化学記号を一つ描き、それらを黒板に張り付けてもよい。モル尺の千分の一は、1mmolの物質質量を示す。モル尺を使って物質質量を測定するには、測定したい化学物質とモル尺の間で、要素粒子を一対一対応させる。このように、数学的な「関係」に加えて、原理（方法）の可視化のためにも、教具が利用できる。類似の具体物から類推¹⁴⁾を促し、学習することも教具の役割である。このような可視化教具における要点は、学習教材の主題 contents を見失わないことにある。

球とスティックとで組み立てる「分子模型」を思い出してみる。分子模型では、分子における原子間の距離や角度の「相似の関係」を球とスティックとで表している。肉眼ではみえない原子間の配置、例えば、ベンゼンの六角形を、分子模型として組み立てると、両者の間の相似性を基に、生徒のイメージを膨らませて類推をうながすことになる。球とスティックの色分けや大小関係は、実際の分子とは無関係であり、原子や結合の種類を区別するために利用されているにすぎない。例えば、黒球を酸素原子にあてはめた分子模型では、生徒は酸素原子は「黒」という印象を強く抱く。教具の（学習に無関係な内容の）印象が強すぎてしまうのである。次節では、目にはみえない原子・分子の「可視化」教具として、豆を利用する。このとき模型としての教具は、豆集団の粒子性と豆ひとつの質量を基に、実在物質の世界の「つぶ構造」とつぶひとつの質量を類推させようとしているのであって、豆の形などは「無関係内容」

である。このようなタイプの教具においては、学習の主題とは無関係な内容を排除することが利用上の要点となる。生徒は教具の具体性（物体の性質など）に強い印象を受けてしまいがちであるから。

2 物質量に関する生徒用モデル実験「豆世界」について

原子・分子に関連する学習事項には、記号表現が多い。そのようなとき、生徒に具体物の模型を与え手作業をさせると、学習に有効なこともある。以下では、物質量をめぐって総合的に学習する（定着用あるいは発展用）一連のモデル実験を提案する。この模擬実験では、豆を原子や分子に見立てる「つぶの世界」から、類推を働かせながら物質量を学ぶ。前々報の「学習シート」のように、物質量は原子の相対質量とは別途に学習できるのだが、本実験は、現在の高校化学教科書の（原子量を説明してからモルを導入する）流れに合せている。豆を二種類、例えば「小豆」と「いんげん豆（金時豆など）」を用意する。基準に選ぶ小豆1粒の質量は、いんげん豆1粒の質量の5分の1よりも軽くくらいがよい。米粒やごま粒では、小豆粒よりも小粒なので質量の変動がより小さくなり測定しやすいが、12 g程度では多すぎて、数えるのに時間がかかる。豆の粒をよくそろえておく。乾燥にも要注意。この実験では、左右の皿で均衡させる型の天秤を使う。

実験1では、小豆を直接、数えて、小豆ひとつの質量 m_a (小豆) を計算するが、現実の化学物質では実際には数えきれない。実験2では、小豆を使って原子質量単位 u を定める。化学では、 $A_r(^{12}\text{C})$ の値は厳密に12と定められていて、小豆でもそうできる。実験3でも、豆粒が数えられると仮定する。この仮定は、後の実験で物質量の関係式に代替される。二種類の豆を直接比較して、 A_r (いんげん豆) を求める。実験4では、SIモルの定義をそっくりまねている。数 x だけがわかって物質量を測定したことにはならない。このことは、天秤で物体の質量を測定したとき、分銅の質量が知れていなければならない状況に、似ている。式 n (要素粒子の化学記号) $= x \times n_a$ で考えるとよい。実験5では、豆世界のアボガドロ定数を調べる。この豆世界と原子・分子の世界とで、モルやアボガドロ定数を比べてみると、両世界のスケールの違いがよくわかる。生徒には自由研究として、化学物質のアボガドロ定数 N/mol の測定法を調べさせてもよい。実験6では、容器イ (いんげん豆) のモル質量は、 A_r (いんげん豆) を測定した段階で、求められていた。実験7では、気体に関するアボガドロの法則を仮定すれば、分子数を数えないで、相対質量の商が得られることを体験する。本モデルは古典的な化学実験であるが、現代化学では、質量分析法などで、イオンの相対質量を直接的に比較して求めている。実験8では、化学物質において、分子式が既知ならば要素粒子ごとの総質量がわかること、つまり、分子式を求めるときの逆の化学操作を体験する。実験9では、化学変化のシミュレーションによって、実験式を求める化学操作を体験する。高校化学では、モル質量あるいは相対質量を既知としてよい。生徒に与える容器の中の二種類の豆の割合は1:2とか2:1とか簡単にしておく。

(生徒用実験の手引) モルの概念と測定法とモデル実験 (豆世界)

目的: 小豆といんげん豆 (その他, 大小のガラス玉や硬貨などでもよい) を原子や分子に見立

て、原子や分子の操作を模擬体験する。豆世界の一連の実験を通して、物質質量 n と質量 m と相対質量 A_r (あるいはモル質量 $M = A_r \text{ g/mol}$) 三者の関係 $M = m/n$ やモルやアボガドロ定数などを理解する。

注意：これから「量/単位=数値」という表現法を使う。この式の左辺は測定される量と測定用単位との割算を表し、右辺は測定された数値(のみ)を示す。「量=数値×単位」とも書く。

実験準備：粒のよくそろった小豆といんげん豆と、透明な容器複数個(等質量)と、豆を数えるときに使う器(プラスチック製の小鉢など)を用意する。その他、天秤や電卓やマジックペンなど。透明容器が等質量でない場合、操作が少し違ってくる。

実験1：基準物質の質量測定

容器アに、質量 m が約 12 g の小豆(1粒の増減で数値は変る)を正確に測り取る。この容器中の粒数 N を数え、小豆ひとつの質量 m_a (小豆)を計算する。

$$m(\text{小豆})/\text{g} = [\quad] , N = [\quad] , m_a(\text{小豆})/\text{g} = [\quad]$$

考察：小豆は原子 ^{12}C に、 N はアボガドロ数に、相当する。

実験2：原子質量単位の定義

小豆ひとつの質量の $1/12$ を「豆質量単位」 $u = m_a(\text{小豆})/12$ と定める。単位 u で豆ひとつの質量 $m_a(\text{豆})$ を測定したときの数値を $A_r(\text{豆})$ と置く。実験1の結果を使い、 u を計算する。

$$m_a(\text{小豆})/u = A_r(\text{小豆}) = [\quad] , u/\text{g} = [\quad]$$

考察：小豆ひとつを「分銅」に見立てると、その質量は $12u$ となる。上の $A_r(\text{小豆})$ の値は厳密に成り立つか？

実験3：原子相対質量の測定

いんげん豆 N 粒を入れた容器イを作る。この容器を天秤の左の皿にのせ、右の皿に空の容器をのせて、小豆を入れていって(ほぼ)釣り合わせる。その小豆の数 x を求める。この測定値を使って、相対質量 $A_r(\text{いんげん豆})$ を得る。さらに、 $A_r(\text{いんげん豆})$ と $A_r(\text{小豆})$ との商を計算しておく。

$$x = [\quad] , A_r(\text{いんげん豆}) = [\quad] , A_r(\text{いんげん豆})/A_r(\text{小豆}) = [\quad]$$

考察：いんげん豆の総質量 $N \times m_a(\text{いんげん豆})$ と「小豆分銅」の総質量 $x \times 12u$ は等しい。故に、いんげん豆の相対質量 $m_a(\text{いんげん豆})/u$ は、 $12x/N$ と測定できた。この実験では、左の皿のいんげん豆の数は N でなくてもよいことがわかる。その理由を考えよう。この実験では、単位 u の数値 u/g を実際には使っていないこと、を確かめよう。

実験4：モルの定義

前出の容器ア（小豆約 12 g, 数 N ）の物質質量を、豆世界のモルと定める。この容器の物質質量 n （小豆）を mol と n_a を使って書く。

$$n(\text{小豆}) = \text{【 } \quad \text{】} \times \text{mol} = \text{【 } \quad \text{】} \times n_a$$

考察：上の数値【 】を物質 ^{12}C の 12 g の場合と比べてみよう。このモルを使って（ N も n_a も実際にはわからないとして）豆世界の物質質量を測定してみよう。例：小鉢にいんげん豆を入れる。小鉢中のいんげん豆ふたつと容器ア中の小豆ひとつを対にしていって、ちょうど釣り合えば、小鉢の物質質量 n （いんげん豆）は 2 mol となる。

実験5：アボガドロ定数の計算

容器アを使って、豆世界のアボガドロ定数 N_A と n_a を求めよう。

$$N_A = N/\text{mol} = \text{【 } \quad \text{】} / \text{mol}, \quad n_a = (1 \text{ mol})/N = \text{【 } \quad \text{】} \text{ mol}$$

考察：容器イ（いんげん豆）を使っても（ほぼ）同じ数値になることを確かめよう。豆世界と化学の世界のアボガドロ定数を比べ、その違いがどこから生まれたかを考えよう。

実験6：物質のモル質量の測定

実験2と3の結果を使い、豆のモル質量 M を求めよう。

$$M(\text{小豆}) = \text{【 } \quad \text{】} \text{ g/mol}, \quad M(\text{いんげん豆}) = \text{【 } \quad \text{】} \text{ g/mol}$$

考察：ここで、モル質量の商は相対質量の商に等しいことを復習しておく。

実験7：同温、同圧、同体積の気体の場合

容器アと容器イの豆を気体分子だと仮定し、同温同圧同体積とする。いんげん豆と小豆の相対質量の商と、いんげん豆だけの相対質量を求めよう。ただし、豆粒は数えられないとする。

$$A_r(\text{いんげん豆})/A_r(\text{小豆}) = \text{【 } \quad \text{】}, \quad A_r(\text{いんげん豆}) = \text{【 } \quad \text{】}$$

考察：原子・分子の世界では、豆のように粒数を簡単に数えられない。この条件下では、アボガドロの法則により、 $n(\text{小豆}) = n(\text{いんげん豆})$ となる。故に、容器各々の質量を測定して商を求めれば、相対質量の商となる。すると、定義により $A_r(\text{小豆}) = 12$ なので、 $A_r(\text{いんげん豆})$ が求められる。実験3（つぶを数えたとき）の商 $A_r(\text{いんげん豆})/A_r(\text{小豆})$ と比べる。

実験8：化合物（または混合物）の場合

この実験用の容器には、小豆ひとつといんげん豆ふたつを対にした化合物（または混合物）が入っているが、総数は不明である。容器の中の豆は分けられない、とする。 $A_r(\text{小豆})$ と $A_r(\text{いんげん豆})$ を使って、小豆だけといんげん豆だけの質量を求めよう。

$$m(\text{いんげん豆})/\text{g} = \text{【 } \quad \text{】}, \quad m(\text{小豆})/\text{g} = \text{【 } \quad \text{】}$$

考察：この化合物では、 $n(\text{小豆}) = n(\text{いんげん豆})/2$ と考えられる。他方、どの豆でも $m(\text{豆})$ は $M(\text{豆}) \times n(\text{豆})$ に等しい。そこで、 $m(\text{小豆})$ 対 $m(\text{いんげん豆})$ は、 $A_r(\text{小豆})$ 対 $2 \times A_r(\text{いんげん豆})$ に等しい。容器中の豆全体の質量を測定し、それを $A_r(\text{小豆})$ 対 $2 \times A_r(\text{いんげん豆})$ の割合で分ければよい。最後に、容器中の豆を手で分けて、各々の総質量を測定し、上の実験結果と比較する。

実験9：化学反応の場合

この実験用の容器には、教師が前もって準備した混合豆（小豆といんげん豆の割合は生徒には不明）が入っている。混合豆を「化学物質」に見立てる。この化学物質が（例えば、加熱）分解し、小豆がでてきた。残りはいんげん豆とする。容器の中の小豆といんげん豆の割合（実験式）を求めよう。豆つぶは数えられないとする。

$$\begin{aligned} m(\text{容器中の豆全体}) &= [\quad] \text{ g}, \quad m(\text{小豆}) = [\quad] \text{ g}, \quad m(\text{いんげん豆}) = [\quad] \text{ g} \\ n(\text{小豆}) &= [\quad] \text{ mol}, \quad n(\text{いんげん豆}) = [\quad] \text{ mol} \\ n(\text{小豆}) / [\quad] &\div n(\text{いんげん豆}) / [\quad] \\ n([\quad] \times \text{小豆}) &\div n([\quad] \times \text{いんげん豆}) \\ \text{小豆の数} : \text{いんげん豆の数} &= [\quad] : [\quad] \end{aligned}$$

考察：この容器から小豆を手で取り出し、その総質量 $m(\text{小豆})$ を求め、豆全体の質量から引算して、いんげん豆の質量を得る。次に、それぞれの質量（グラム単位）をモル質量、 $A_r(\text{小豆})\text{g/mol}$ と $A_r(\text{いんげん豆})\text{g/mol}$ 、で割算して、 n を計算する。得られた n を互いに割算したりして、整数を含む釣り合い（第3行目のバランス式）を求める。この釣り合いの式から、豆の数の割合がわかる。上の3行目以下には全て、整数を入れる。最後に、この容器中の小豆といんげん豆とを実際に数えて、上で求めた混合豆の数の割合（整数比）と一致するか、確かめる。

註と文献

- 1) 前々報（授業計画）は、森川鐵朗・樫田豪利『上越教育大学研究紀要』22(2), 637-651 (2003)にある。つぶとみなすことや生徒用学習シート、物質質量の概略史や物質質量に関する高校化学教材などはこの授業研究を参照する。物質質量の考え方のエッセンスは要素粒子を「つぶとみなすこと」だが、つぶを物質質量の説明には利用しても、物質質量そのものの定義には使わない。つぶの定義はあいまいであるから。要素粒子ひとつの物質質量 n_0 に関するバランス式を使うのがよい。なお、p.640 最下段「使われだした前世紀」は「使われだした 19世紀末」と、同行「定められた今世紀」は「定められた 20世紀」と、読み替える。前々報の註17にある「ここでの第1式と第3式は」から「と第3式」を削除する。この第1式は、D. Ainley, *Educ. Chem.*, 28(1), 18-19 (1991)にもみえる。
- 2) 前報（指導案）は、森川鐵朗・樫田豪利『上越教育大学研究紀要』23(1), 245-260 (2003)にある。物理量で釣り合わせる考え方（バランス法）や指導法などは、この紀要論文とその注釈を参照のこと。
- 3) 新着の雑誌で Freeman は、自然界において、体積の3次元性、質量の慣性などと対比させながら、“quantity of matter”を記述する物質質量は“a newly recognized property of nature”であって、関連する特性は“microgranularity of matter”と説明する。Robert D. Freeman, “SI for Chemists:

Persistent Problems, Solid Solutions," *Journal of Chemical Education*, 80(1), 16-21 (2003) による。なお, George Gorin (Professor Emeritus, Oklahoma State U.) 氏は本授業研究の筆者の1人 (T. M.) に, 8月28日 (2003) 付の手紙で, "I do not think that Freeman's phrase, microgranularity of matter, is helpful in the present context; it may be OK to describe the nature of matter QUALITATIVELY." と述べている。

- 4) 生徒が物質のつぼ構造を「納得」する教育は極めて重要である。原子や分子の存在を自明とすることから出発するのではなくて, 物質は確かに「つぼ」でできていることを受け入れるための教育課程である。ここでの要点は, つぼ構造と連続体との対比, 分割できることでは「つぼ」を説明したことにはならないこと, など。森川鐵朗『上越教育大学研究紀要』7(3), 93-99 (1988) を参照のこと。この紀要論文 (1988) では, 原子や分子を学習する以前に, 物質のつぼ構造を理解することが重要だとしたが, 現在の化学教程 (高校まで) ではこの段階は抜かれている。そこで, 本授業研究のシリーズでは学習順序を逆にして, 原子や分子 (要素粒子) を同一視することで, 物質のつぼ構造を生徒に理解させようとしている。
- 5) 科学教科書や教育資料などの説明文は数式で表現してみると, その内容がよく見えてくることがある。現在の日本ではモルの説明は, 註1と2の紀要論文やそこでの引用文献で検討したように, その他にも以下の化学教科書や化学啓蒙書 (註15-20) などにもみられるように, バリエーションはあるが, 結局は次の2式にまとめられるであろう。第1式は「モル (あるいは, 物質質量) はアボガドロ数 (粒子の数) のこと」だと解釈する文脈の表現である。ここで, N は 12g の炭素 ^{12}C の数 (数値) のことで, $6.02 \dots \times 10^{23}$ と測定されている。そこで, この第1式と「1 doz = 12」とを比べて「モルは原子や分子の個数を表す (ダースのような) 単位」「モルはダースのように数を束ねた単位 (counting unit)」のことで解説されるのである。モルはSIの7基本単位のひとつで, 単に数を示すダースのようなものであるはずがないのだが。ときには, 助数詞である「個」を添付して「モルは原子や分子のアボガドロ数個のこと」ともいう。つまり, 第2式となる。無論「個」は英語ではないので, この式そのものは英語圏の文献には現れないが, 例えば, Malone (以下の註21) は「個」のところに "objects or particles" を置いて, 1 mol はアボガドロ数のことだと説明している。SIでは「モルは…系の物質質量」と定義しており, IUPACの文書 (註7) などでは「モルは物質質量」で「物質質量は物理量」のリストに入っているためか右辺の, 数 (あるいは, 数値) も物理量の一つ (第1式) だとか, 個数は物理量 (第2式) だとか, との説明も日本ではみかけられる。

$$1 \text{ mol} = N$$

$$1 \text{ mol} = N \text{ 個}$$

IUPACの文書 (註7) の p.5 で「物質質量という物理量は化学者にとって特別に重要である。ある物質の物質質量はその物質の指定された要素粒子の数に比例する。その比例係数はすべての物質で等しく, その係数の逆数はアボガドロ定数である。」と和訳されている。ここの「数」のついた翻訳語「比例係数」と「その係数の逆数」は英文ではそれぞれ, "proportionality factor" と "its reciprocal" で, 必ずしも数を意味しない。この説明文をそのまま数式化すると, 次の第1式のように書ける。ここで, $n(\text{B})$ は注目している物質の物質質量で, Bはその物質の要素粒子であり, $x(\text{B})$ はBの数で, N_A がアボガドロ定数である。註1の前々報では, アボガドロ定数の逆 ($1/N_A$) を要素粒子ひとつの物質質量だと (新規に) 解釈して, それを $n_a(\text{B})$ と置いた。このとき, 教育的配慮をして $n_a(\text{B})$ のようにBを添付したが, 実際には「どの要素粒子でもひとつの物質質量は同じ」なので, Bをはずしてもよくて「その比例係数はすべての物質で等しい」ことに相応させてもよい。すると, 次の第2式を得る。フレーズ「物理量は数値と単位との積」からこの第2式表現を眺めると, 物質質量 $n(\text{B})$ を単位物質質量 n_a を使って測定すると, 数値 $x(\text{B})$ が得られる, となる。上の翻訳文は, このフレーズの物質質量版であった。物質質量 $n(\text{B})$ を, 1 mol に選べば, 以下

の第3式となる。この第3式をモルの正しい表現として採用して、本授業研究は組み立てられている。ここまでのモルの諸式を比べると、モルの諸解釈の違いは、右辺の n_a の有無にある。なお、 $n(B)$ は本授業研究で説明してきたように、 n_a がわからなくても実際に測定できることに注意しよう。第2, 3式を基に、 $n(B)/\text{mol} = x(B)/N$ を得る。

$$n(B) = x(B) \times (1/N_A)$$

$$n(B) = x(B) \times n_a$$

$$1 \text{ mol} = N \times n_a$$

「モルは粒子の(個)数のこと、 $1 \text{ mol} = N$ 個」だから「個数といえばよいのに、なぜ難しく物質質量というのか」というモルの解釈・疑問は、物質質量教育に対して重要な示唆を与える。今、質量の概念を知らない(持たない)生徒を想定する。目の前にある天秤で物体の質量が、グラム分銅3個と釣り合ったとして、分銅を1, 2, 3と数えて「ほら、3個あるので、3グラムだ」と説明したとする。すると、この生徒は「なぜ、わざわざ、3グラムというのだろう、3個でよいではないか」と疑問を抱くかもしれない。あるいは、グラム分銅に1gと刻まれているので「3個分で3gと記号を添えただけか」と理解するかもしれない。生徒が質量という概念を持っていればこそ「3グラム」を質量として受け入れてくれるのである。物質質量の場合も同じ様子となる。物質質量の概念を持たない生徒に「粒子が N 個あるので、物質質量は1 mol となる」と説明すると「どうしてわざわざモルを使って、ややこしくするのか、 N 個でよいではないか」となる。生徒に「数える」方法を教えても(n_a を理解できないで落としてしまうので)モルという物質質量を説明したことにはならないのである。

- 6) 国際単位系や和訳科学用語「物質質量」「モル」「要素粒子」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。モルをめぐる最新の手引は、G. Gorin, "Mole, Mole per Liter, and Molar: A Primer on SI and Related Units for Chemistry Students," *Journal of Chemical Education*, 80(1), 103-104 (2003) をみる。
- 7) 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。英文2版 p.46 (v) Amount of substance and the specification of entities で、初版にない、その末尾に挿入された文は、 $pV = nRT$ に気体要素粒子の指定がないこと、に答えている。
- 8) 物質質量の認識における化学体験の議論などについては、森川鉄朗・西山保子「物理量としての単位モルの導入法について」『上越教育大学研究紀要』16(2), 651-659 (1997) を参照のこと。この p.654, 9行目「物質同志」を「物質同士」と読み替える。
- 9) 化学分析の計算例は、森川鉄朗・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) の「d. 有機物の燃焼」にある。
- 10) 化学反応式の教育的な議論は、三井澄雄『化学指導ノート』麦書房(1977)のII. 5「化学教材の見方・扱い方」に採録されている。『中学校・理科』準拠 理科教材の見方・扱い方 化学教材編』大日本図書(1962)を参照するとよい。
- 11) この最初の化学反応式は、日本化学会編『化学史/常識を見直す—教科書の誤りはなぜ生まれたか』講談社B747(1988)の第2章による。ラボアジェ『化学のはじめ』田中豊助・原田紀子共訳、内田老鶴圃新社(1979, 古典化学シリーズ4)第1部第XIII章 pp.81-88を参照のこと。炭酸は、現在の二酸化炭素のこと。なお、化学反応や化学物質、古典的物理化学現象に関する「ラボ

アジェ的理解・認識」「ドルトンの理解・認識」「アボガドロ的理解・認識」は、本授業研究における造語である。

- 12) 水の分解反応式には $2\text{H}_2\text{O}$ と O_2 が現れる (分子数が 2 と 1 な) ので「一対一対応」ではない、との指摘を聞いた。この誤解は、要素粒子としては原子や分子ひとつにしか選べないこと、に基づいているようだ。要素粒子は化学量論係数こみで選べること、今の場合では、 $2\text{H}_2\text{O}$ を一つの要素粒子とみなせること (したがって、 $2\text{H}_2\text{O}$ と O_2 とが一対一対応していること) に注意しよう。要素粒子ひとつ (の選択) は、はんぺんや竹輪などいろいろな種を一つにまとめる「おでん」の一串のようだと、生徒に説明できる。前報 (註 2 の紀要論文) や森川鐵朗・田口 哲『上越教育大学研究紀要』20(2), 535-548 (2001) を参照のこと。後者の紀要論文 (2001) の p.545 の註14「前世紀末」は「19世紀末」と読み替える。
- 13) R. Justi and J. K. Gilbert, "Models and Modeling in Chemical Education" in *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, edited by J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust and J. H. van Driel, Chap. 3, pp.47-68, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2002) など。
- 14) 生徒に類推を積極的に教える化学実験は、樫田豪利・森川鐵朗『化学と教育』51(9), 569-570 (2003) で提案した。
- 15) 高橋金三郎『化学入門』新生出版 (1977) では「12 個を 1 ダースというように、 6×10^{23} 個を 1 モル (mol) という (p.57)」「牛乳びんにデンプンをぎっしり詰める…デンプン粒の数は何 mol か (p.66)」「(アルミ) 1 円貨に何 mol の原子が含まれているか (p.67)」とある。
- 16) 石川正明『化学の発想法』駿台文庫 (駿台レクチャーシリーズ, 1991, 第 9 刷 2000) 第 1 章 p.10 では「粒子の単位として、個, ダース, mol 等がある… (物質量は) 英語に引きずられて、自主性をもたずに訳したという、悲しい輸入文化の伝統」とある。第 8 章 p.118 では「1 アボガドロ数を 1 単位とした粒子数 = mol を使って、粒子数を計算するとよい」とある。
- 17) 日本の高校教科書、例えば、啓林館の化 A 609 (1997) では、p.21 あたりに「12 個をまとめて 1 ダース…これと同じように考えて」モルは「アボガドロ数と同じ個数の粒子からなる物質の分量」とある。新編化学 I (008, 平成 15 年度用) の p.28 では「 ^{12}C 原子の 12 g の中に含まれる原子と同じ個数の粒子を含む物質の量を 1 モル (単位記号 mol) といい」、同じページの上の方には「個数で数えたり、その個数が多いときには、12 個をまとめて 1 ダースという単位で表したりする」とある。化 I (007) の p.43 には「粒子の数を表す量として物質量というものをを用いる」とある。つまり、啓林館本の文脈全体ではモルをダースのような数あるいは個数のことと考えている、と読み取れる。このように、さらに註 5 のように、日本の高校化学教科書では大勢は「モルは粒子の (個) 数」のことだと教えてきたし、利用者の多くはそう理解してきた。
- 18) 小川邦康・大矢浩史監修『図説雑学 化学のしくみ』ナツメ社 (2000) では「モルとは原子や分子の個数を意味する単位 (p.108)」「1 モル = 6.02×10^{23} 個 (p.116)」とある。米山正信『化学のしくみ』日本実業出版社 (入門ビジュアルサイエンス, 第 10 刷, 1997) では「鉛筆など 12 本を 1 ダースという…のと同じ… 6.02×10^{23} 個を 1 モルと呼ぶ (p.64)」とある。
- 19) 左巻健男編著『化学超入門』日本実業出版社 (2001) では「個数を表す単位 mol (p.111)」「1 ダースは 12 個ですが、1 mol は 6.02×10^{23} 個 (p.112)」とある。
- 20) 石井菊次郎『化学と教育』50(4), 333-334 (2002) では「1 mol とは…粒子の数である」「物質量といわれている物理量が実は粒子の数である」と説明し、物質量は「第一線の化学者にとっても重荷であり、当然、生徒・学生には手強い相手」ともいう。
- 21) L. J. Malone, "Basic Concepts of Chemistry," John Wiley & Sons, New York, seventh ed. (2004), Chap. 8, pp.215-218 をみよ。ここではモルを "counting unit" として詳しく説明している。
"One mole is defined as the number of atoms in exactly 12 grams of ^{12}C " とある。本書の索引には "Avogadro's number" はあるが、"Avogadro constant" はみあたらない。なお、本書の出版年は 2004 となっているが、2003 年 8 月に入手できた。

Tools for Teaching Chemical Amount and the Mole – Development and How to Use

Tetsuo MORIKAWA* and Hidetoshi KASHIDA**

(Received October 14, 2003; accepted December 1, 2003)

ABSTRACT

A previous paper (Vol. 23, No. 1, 2003) proposed an instruction plan for teaching chemical amount and the mole in school chemistry. This paper deals with teaching tools for the instruction plan. The first segment describes how to design and how to develop tools for teaching chemical amount. The second section addresses a model made by hand for high school students; this modeling experiment concerns 'amounts' of red and kidney beans as two kinds of chemical substance. It should be noted that the tools for teaching chemical amount and the mole have to present 'corpuscular concept (granularity) of matter' to the learners.

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

** Senior High School Attached to the Faculty of Education, Kanazawa University, Kanazawa 921-8173, Japan