

化学変化の量的関係の理解の要となる物質質量 (mol) の学習に関わる諸課題と授業改善に関する一考察

－比の見方・考え方の観点から－

山田 貴之*・松本 隆行**・後藤 顕一***
稲田 佳彦****・岡崎 正和****・小林 辰至*****

(令和2年6月29日受付；令和2年12月1日受理)

要 旨

本論では、化学反応における量的関係を理解する上で重要な概念となる物質質量 (mol) を取り上げた。物質質量 (mol) は国際単位系 (SI) の一つとして、国際度量衡総会において定義された物理量である。当初、物質質量 (mol) は質量と関連付けて定義されていたが、質量から完全に切り離された、物質の量を粒子数で表す単位とする再定義が2019年から発効している。高等学校の理科に物質質量 (mol) が導入されたのは、昭和53年告示の高等学校学習指導要領の理科 I からであるが、高等学校の生徒には理解が難しいとされてきた。しかし、再定義された物質質量 (mol) は、質量とは関係なく単純に、アボガドロ定数に対する粒子数の比の代数式の関係として捉えれば良いことから、従来よりも指導は容易になるものと思われる。そこで、まず平成30年告示の高等学校学習指導要領理科の化学基礎で求められている、「化学反応式の係数の比が化学反応における物質質量の比を表すこと」を見だして理解させる授業のモデルについて述べた。次に、モルの導入やその定義に関する議論及び高等学校学習指導要領理科での取扱いの変遷を振り返り、長きに渡ってモルの捉え方が混乱していた事実を整理して述べた。さらに、国際度量衡総会において、質量と関連付けられていた物質質量 (mol) の定義が、質量から切り離されて、粒子の数に基づく物質の量の表し方として再定義されたことを述べた。そして、これらを受けて、高等学校生徒に物質質量 (mol) の定義を代数式で理解できるようにするためには、小学校、中学校、高等学校の接続及び、算数・数学と理科との教科等横断的な学習指導の観点から、「関数的な見方・考え方」の一つである「比の見方・考え方」を働かせられるよう学習指導を行うことが大切であることを提案的に述べた。

KEY WORDS

chemical change 化学変化, quantitative relations 量的関係, amount of substance 物質質量 (mol), class improvement 授業改善, viewpoints / thinking of ratio 比の見方・考え方

1 はじめに

物質質量 (mol) は、化学反応における量的関係を理解する上で重要な概念である。モル (mol) は1971年に、国際単位系 (SI) の一つとして、国際度量衡総会 (CGPM) において定義され、2019年に物質の量を粒子数で表す物質質量の単位として再定義された。高等学校の化学では、モルが国際度量衡総会で定義される前から導入されていたが、質量の単位かそれとも粒子数の単位かなどの議論がなされ、その定義が混乱していた。例えば、昭和35年度に改訂された高等学校学習指導要領に準拠して編集された化学Bの教科書では、モルを質量の単位として説明したり、分子や原子の数の単位と説明したりするなど、出版社によりまちまちであった (樋口⁽¹⁾, 岩崎⁽²⁾)。

高等学校学習指導要領理科に「物質質量」という用語でモルが導入されたのは、国際度量衡総会で定義された後の、昭和53年告示の高等学校学習指導要領理科⁽³⁾の理科 I からである。しかし、理科 I の教科書の記述は、国際単位系 (SI) の定義に即して説明がなされているものもあれば、そうでないものもあるなど、まちまちであったり、単位としてのモルの扱いが不十分であったりした (佐野⁽⁴⁾, 片平・高野・長洲⁽⁵⁾, 今井・下條⁽⁶⁾)。また、物質質量が国際度量衡総会によって定義されて約30年経過した頃にあっても、モルは物理量か否かについての議論もあった (森川⁽⁷⁾, 岸田⁽⁸⁾)。

このような中、国際度量衡総会で新たなモルの定義が審議・採決され2019年に発効した。新しい定義では、質量との関連性を解消し、「モル (記号mol) は、物質質量のSI単位であり、1モルには、厳密に $6.02214076 \times 10^{23}$ の要素粒子が含まれる。この数は、アボガドロ定数 N_A を単位 mol^{-1} で表したときの数値であり、アボガドロ数と呼ばれる⁽⁹⁾」と

*自然・生活教育学系 **修士課程 (学校教育専攻) ***東洋大学 ****岡山大学 *****岡山理科大学

再定義された。なお、アボガドロ定数 N_A は、シリコン (Si) の単結晶をX線結晶密度法により、これまで不確かであった数値の部分を高精度で測定し、一つの値として定義された⁽¹⁰⁾。これにより、長く続いたモルは質量の単位か、それとも粒子数の単位かなどの議論に決着がついたと言える。

物質量は、化学反応における量的関係を理解するために重要な概念であるが、高等学校の生徒への指導は難しいことが指摘されている(蓑手⁽¹¹⁾、田村⁽¹²⁾、広瀬・森川⁽¹³⁾、石井⁽¹⁴⁾、松浦・片平⁽¹⁵⁾、今井・濱中・下條⁽¹⁶⁾)。その理由の一つは、物質量の概念は多様な基礎的概念が構造化されていることにある(堀⁽¹⁷⁾)。

平成30年告示の高等学校学習指導要領解説理科編の化学基礎では、化学反応式が化学反応に関与する物質とその量的関係を表すことを生徒自身が見いだして理解できるように指導することが求められている。本論では、まず、物質量と化学反応式の量的関係に気付かせ理解させることを意図して提案されている授業モデルについて述べる。次に、モル及び物質量の導入やその定義の変遷、高等学校学習指導要領理科での扱いの変遷を振り返り、定義に関わる問題点を浮き彫りにする。さらに、化学における量的な関係の理解の深め方を、算数・数学と理科との教科等横断的な視点及び、小学校の算数、中学校理科、高等学校化学の接続の観点から提案的に述べる。

2 高等学校学習指導要領 (平成30年告示) の化学基礎における物質量と化学反応式

平成30年告示の高等学校学習指導要領解説理科編の化学基礎では、化学反応式を扱う目的について、「化学反応に関する実験などを行い、化学反応式が化学反応に関与する物質とその量的関係を表すことを見いだして理解させることがねらいである⁽¹⁸⁾」と記している。そして、その取扱いでは、「化学反応式の係数の比が化学反応における物質量の比を表すことを扱う。また、反応に関与する物質の質量や体積の間に成り立つ関係を物質量と関連付けて扱い、物質の変化量を化学反応式から求めることができるようにする⁽¹⁹⁾」と記している。さらに、扱う実験として炭酸カルシウムと塩酸を反応させる実験や炭酸水素ナトリウムの熱分解の実験などを例示し、「化学反応式の係数の比と化学反応における物質量の比はどのような関係になっているのかについて、得られた結果から反応物と生成物の物質量の比を求めさせ、化学反応式の係数の比と比較させることを通して、物質量の比が化学反応式の係数の比を表していることを見いだして理解させることが考えられる。また、化学反応式の係数の比が、反応物と生成物の質量の比を表しているのではなく、物質量の比を表していることに気付かせ、化学反応の量的関係を物質量で表すことの有用性を感じさせることが大切である⁽²⁰⁾」と記している。

中学校では、銅などの金属に反応する酸素の質量との関係を調べる実験を通して、銅に反応する酸素は質量比で4:1の一定の関係があることなどを学んでいる(図1)。また、この実験に先立ち、化学変化を原子や分子のモデルで考えたり、金属の酸化を化学反応式で考えたりするなどの学習を行っている。教科書によっては、「鉄と硫黄が化合するとき、鉄の原子が硫黄の原子と1:1の割合で結びついて、硫化鉄ができる⁽²¹⁾」と説明されており、化学反応式の係数が原子や分子の粒子数を表していることを示唆している。しかし、中学校では、化学反応式の係数が粒子数の比であることを、理解させることまでは求めている。

化学基礎では、化学反応式の係数が質量比ではなく、粒子数の比、つまり物質量の比であることを、実験を通して見だし理解させることが求められている。

これを受けて、後藤・飯田・野内・西原・渡部⁽²²⁾は、具体的な授業の展開の仕方について、以下のような授業モデルを提案し実践を行っている。

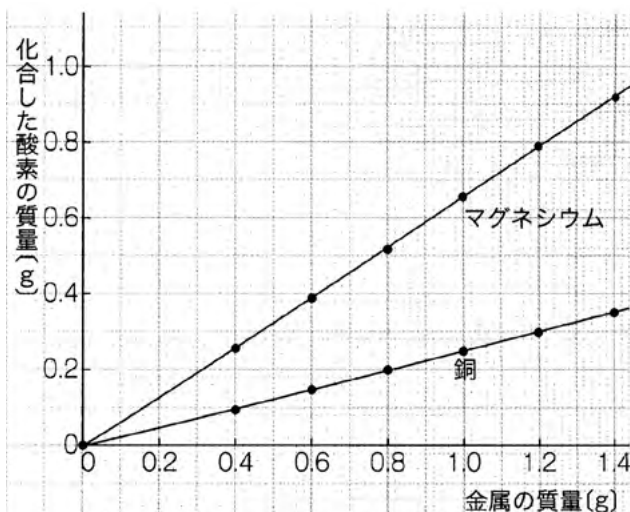


図1 金属の質量と化合した酸素の質量の関係
(「新しい科学 2年」(東京書籍, 2012)より転載)

- ・ 1時間目では、中学校で扱った炭酸カルシウムと塩酸の反応を用いて、反応前の炭酸カルシウムと反応後に生成する二酸化炭素の質量の比を求め、化学反応式の係数の比と一致しないことを気付かせ、化学反応式の係数の比は物質質量の比と一致することを示して、他の反応でも同様のことが成立するかどうか疑問を持たせる。
- ・ 2時間目では、他の反応として再び中学校で扱った炭酸水素ナトリウムの熱分解を取り上げる。反応前の炭酸水素ナトリウムと反応後に生成する炭酸ナトリウムの質量を実験により求め、その物質質量の比が化学反応式の係数比と一致することを見いだして理解させる。

上述の授業の展開の仕方は、新学習指導要領理科の目標に記されている、理科の見方・考え方を働かせ、見通しをもって観察、実験に取り組み、科学的に探究するために必要な資質・能力の育成を目指す化学基礎における授業改善のモデルの一つであり、その要となるのが物質質量である。物質質量は、先述したように生徒にとって理解が難しい概念である。また、物質質量は、質量の単位か、それとも粒子の単位か、あるいは物理量か否かなどの議論に象徴されるように、定義に関わる混乱が長く続いた歴史がある。このような過去の議論や混乱を乗り越えて、新学習指導要領理科の理念を実現する授業改善が行えるよう、第3節では、モルの導入とアボガドロ定数について、第4節では、国際度量衡総会における物質質量の定義と再定義について、第5節では、高等学校の化学へのモルの導入とその変遷について概観する。

3 オストヴァルト (Ostwald, F. W.) によるモルの導入とアボガドロ定数

化学反応式やイオン反応式における係数は原子や分子などの粒子の数を表している。化学反応は、さまざまな種類の原子や分子が結合したり離れたりして結合の組み合わせが変化することであることから、化学反応における量的な関係は、粒子数で考えるのが便利である。物質の量を粒子数で表す物理量であるモル (mol) は、国際単位系 (SI) の一つとして、国際度量衡総会によって定義されている。モル (mol) という用語は、ドイツの化学者オストヴァルト⁽²³⁾によって導入された。記号molはドイツ語のMolekülに由来する。

我が国におけるモルの記述は、池田菊苗がオストヴァルトのGrunlinien Der Anorganischen Chemieを翻訳して、明治37 (1904) 年に出版した「近世 無機化学⁽²⁴⁾」に認められる。そこには、「一物質の一標準重即ち一分子重を瓦にて量りたるものを今後常に一モルと称すべし」と記されている。また、その注釈には「酸素の標準重三二なれば其の一モルは三二瓦、又水の標準重一八・〇一六なれば其の一モルは一八・〇一六瓦なるが如き是なり」とある。このように当時は、全ての物質は分子でできているという考え方に基づいて、その物質の分子量の数字にグラムをつけた量を1モルとし、その単位はグラム分子などと呼ばれていた。つまり当時、モルは質量の単位のように用いられていた。なお、池田菊苗は、1899年から一年半ライプチヒ大学のオストヴァルトのもとに留学している。

物質質量 1 molを構成する分子、原子、イオンなどの粒子の個数を示す定数は、アボガドロ定数と呼ばれている。ヨハン・ロシュミット (J.J. Loschmidt) は、しばしば「アボガドロ数を計算した」とされるが、アボガドロ数そのものを求めたわけではない。ロシュミットは、1865年に気体の分子の直径を理論的に見積もっただけである。この値を用いて単位体積あたりの分子数を求め、標準状態の気体のモル体積をかけると、現在知られているアボガドロ数に近い値が得られるが、彼はそこまでの計算は行っていない。アボガドロ数を測定し決定したのは、ジャン・ペラン (Jean Baptiste Perrin) で、1908年のことである。そして、ペランは1909年にアボガドロの法則 (同温・同圧のもとでは気体の体積は、気体の種類に関わらずそれに含まれる原子または分子の数に比例する) を発見したアボガドロにちなんで、アボガドロ定数と名付けることを提案した。ペランはアボガドロ数を測定し決定した業績により、1926年にノーベル物理学賞を受賞している。

4 国際度量衡総会 (CGPM) におけるモルを単位とする物質質量の定義と再定義

モル (mol) を単位とする物質質量は、1971年の国際度量衡総会において、国際単位系 (SI) の7番目の基本量として定められた。その後、1980年に国際度量衡委員会 (CIPM) により、モルの定義の一部として、補則が加えられた。その定義は以下の通りである⁽²⁵⁾。

- ・モルは、0.012キログラム（12グラム）の炭素12の中に存在する原子の数と等しい要素粒子（elementary entities）を含む系の物質質量である。
- ・モルを用いるとき、要素粒子を指定する必要があるが、それは原子、分子、イオン、電子その他の粒子、またはこれらの粒子の集合体であって良い。
- ・補則：この定義の中で、炭素12は結合しておらず、静止しており、基底状態にあるものを基準とすることが想定されている。

この定義は40年以上の長きに渡って用いられてきた。しかし、2011年に開催された第24回国際度量衡総会において、質量、電流、熱力学温度及び物質質量の4つについて、定義のしかたを変更する方針が決議され、2018年の秋に開催された第26回国際度量衡総会において審議・採択が行われ、2019年5月20日に発効した。

新しい定義では、質量との関連性を解消し、系に含まれる構成要素の数を定義値として、次のように定義された⁽²⁶⁾。

- ・モル（mol）は、物質質量のSI単位であり、1モルには、厳密に $6.02214076 \times 10^{23}$ の要素粒子が含まれる。この数は、アボガドロ定数 N_A を単位 mol^{-1} で表したときの数値であり、アボガドロ数と呼ばれる。
- ・系の物質質量（ n ）は、特定された要素粒子の数の尺度である。要素粒子は、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子、あるいは、粒子の集合体のいずれであってもよい。

つまり、アボガドロ定数 N_A を、 $6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と定義することにより、逆にアボガドロ定数 N_A を用いて、モルを再定義したことになる。この再定義により、モルは質量（キログラム）とは切り離され、純粋に原子や分子の個数に基づく単位であることが明確になった（図2）。

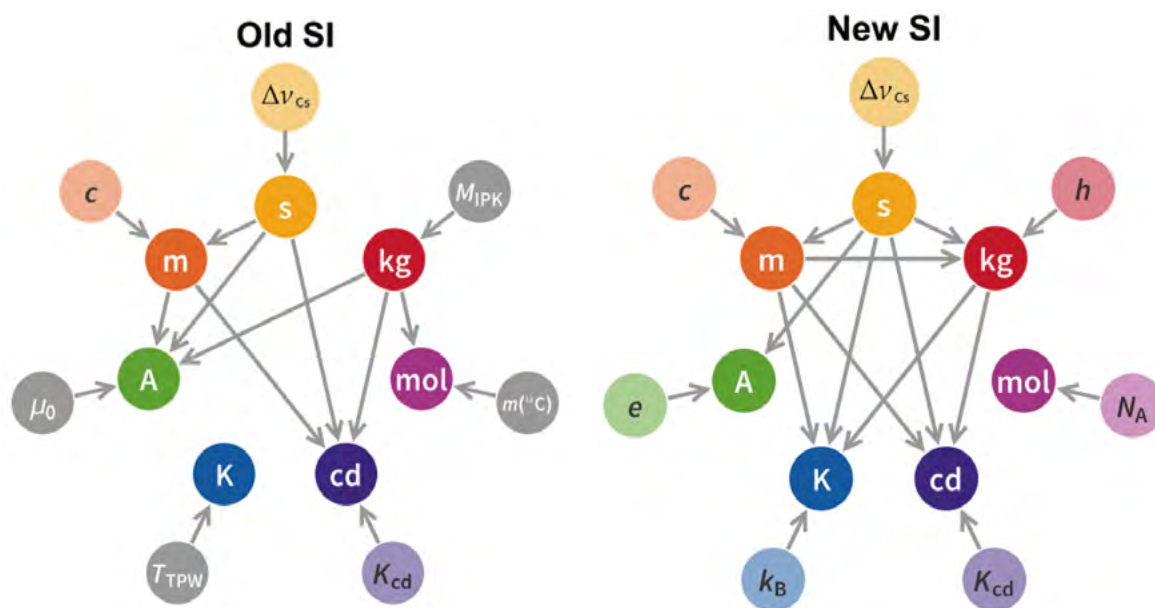


図2 7つのSI基本単位と再定義前（左）及び再定義後（右）における各単位の独立性
 （「<https://ja.wikipedia.org/wiki/SI基本単位の再定義>」より転載）

ある試料に含まれる物質質量 n は、要素粒子の個数 x と次の関係で表される。この式に示されているように、物質質量 n は、要素粒子の個数 x に比例し、比例定数はアボガドロ定数 N_A の逆数である。

$$\text{物質質量 } n = \frac{\text{要素粒子の個数 } x}{\text{アボガドロ定数 } N_A}$$

物質1モルに含まれる $6.02214076 \times 10^{23}$ の要素粒子の質量をモル質量という。つまり、モル質量は、ある物質の化学式量の数字にグラムをつけた質量に含まれる物質質量のことで、「質量÷物質質量」で定義される。池田菊苗が「近世

無機化学」に記した、先述の「酸素の標準重三二なれば其の一モルは三二瓦、又水の標準重一八、〇一六なれば其の一モルは一八、〇一六瓦なるが如き是なり」は、グラム分子の説明である。なお、グラム分子は、モル質量に対する古い用語であり、現在は用いられない。モル質量をアボガドロ定数（正確に $6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ）で除すと、原子や分子などの物質の要素粒子 1 個分の質量が得られる。物質の質量 w (g) とモル質量 M (g/mol) 及び物質質量 n (mol) との間には図 3 に示す関係があり、モル質量 M (g/mol) が既知であれば、質量と物質質量は互いに換算できる。

気体の体積とその分子の数の間には、同温、同圧のもとで、全ての気体は、その種類に関係なく同体積中に同数の分子を含む（アボガドロの法則）という関係がある。つまり、アボガドロの法則によれば、気体 1 mol (6.02×10^{23} 個) の分子が占める体積は、気体の種類にかかわらず同じである。気体 1 mol が占める体積をモル体積といい、標準状態 (0 °C, $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$) で、ほぼ 22.4 (L/mol) である。気体の物質質量 n (mol) と気体の体積 v (L) 及び 22.4 (L/mol) (モル体積) との間には、図 4 に示す関係がある。なお、渡辺・北條 (2008)⁽²⁷⁾ は、高等学校の化学においては、気体 1 mol の体積は、0 °C, 1 気圧のもとで、22.4 L とするのではなく、25 °C, 1 気圧で約 25 L とするのが適切であると述べている。しかし、本論では平成 21 年度告示の学習指導要領に準拠して編集された化学基礎の教科書の記述に合わせて 22.4 L とした。

モル質量 = 質量 ÷ 物質質量

$$M \text{ (g/mol)} = \frac{w \text{ (g)}}{n \text{ (mol)}}$$

物質質量 = 質量 ÷ モル質量

$$n \text{ (mol)} = \frac{w \text{ (g)}}{M \text{ (g/mol)}}$$

質量 = 物質質量 × モル質量

$$w \text{ (g)} = M \text{ (g/mol)} \times n \text{ (mol)}$$

図 3 物質の質量 w (g) とモル質量 M (g/mol) 及び物質質量 n (mol) との間に成り立つ関係

気体の体積 v (L) = モル体積 (L/mol) × 気体の物質質量 n (mol)

$$v \text{ (L)} = 22.4 \text{ (L/mol)} \times n \text{ (mol)}$$

気体の物質質量 n (mol) = 気体の体積 v (L) ÷ モル体積 (L/mol)

$$n \text{ (mol)} = \frac{v \text{ (L)}}{22.4 \text{ (L/mol)}}$$

図 4 気体の物質質量 n (mol) と気体の体積 v (L) 及びモル体積 (L/mol) との間に成り立つ関係

5 我が国における高等学校の化学へのモルの導入とその変遷

我が国の学校教育にモルが導入されたのは、昭和 31 (1956) 年度改訂の高等学校学習指導要領理科⁽²⁸⁾の化学が初めて、国際度量衡総会でモルが国際単位系 (SI) の基本量として定義される 15 年ほど前のことである。当時の学習指導要領では、グラム分子という用語が用いられ、「グラム分子 (モル)」と表記されていることから、グラム分子とモルを同義として取り扱っていると解釈できる。

昭和 35 (1960) 年度に改訂された高等学校学習指導要領理科⁽²⁹⁾では、昭和 31 (1956) 年度に括弧付きで用いられていたモルの用語が削除され、化学 B において「グラム分子」と表記された。そして、その解説理科編において、「グラム分子とモルは同義に使用する。」と説明された。樋口⁽³⁰⁾は、この学習指導要領に準拠して編集された昭和 39 年度用教科書「化学 B」8 冊 (8 種類) について、グラム分子やモルの記述内容を比較検討し、教科書により定義が混乱していることについて、次のように述べている。

- ・ある教科書は、1 グラム分子というのは質量の単位として取扱い、また 1 グラム分子は 1 モルとってよいことになっている。

- ・ある教科書は、1グラム分子とは、本来、分子の数の単位であるという筆法をとっているし、1グラム分子と1モルとは同義語と解釈できる書き方をしている。
- ・ある教科書では、1グラム分子とは、はっきり質量の単位とし、一方、1モルというのが分子や原子の数の単位であるとし、厳然と1グラム分子と1モルが別ものであることを明記している。

樋口⁽³¹⁾は、上述のような混乱を踏まえ、モルに「数の単位」と「質量の単位」の両方の定義をもたせることを提案している。それに対して、岩崎⁽³²⁾は、「モルを「質量の単位」として定義することに賛成できない。ぜひ「粒子数の単位」として定義すべきものと思う、その理由はモルを「質量の単位」として定義した場合dimensionの点から疑問を生じ、引いては高校生のような初歩の化学を学ぶ者を不当に惑わすことになるからである」と述べている。

昭和45（1970）年告示の高等学校学習指導要領解説理科編⁽³³⁾では、モルは原子量、化学式量とともに化学量の一つとして取り上げられている。そして、その取り扱いについて、「モルは分子のみならず原子やイオンなど広く粒子一般について扱い、化学式量との関係が理解できるよう配慮する」と記されている。このように、モルが粒子の数に基づく量の表し方であることには触れていない。このような状況について、片平・高野・長洲⁽³⁴⁾は、モルは質量や数という曖昧な用語の使用が、国際単位系（SI）の基本単位として定義されるまで、長く続いたと述べている。

国際度量衡総会において、モルが物質を表す国際単位系（SI）の基本単位として定義されたのは1971年である。高等学校学習指導要領理科に「物質」という用語でモルの概念が導入されたのは、昭和53（1978）年告示の高等学校学習指導要領理科⁽³⁵⁾の理科Iからである。その解説編では、「物質については、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」と記されている。更に、「原子・分子の質量の相対的な値として原子量・分子量・化学式量を理解させるとともに、モルとの関係を明らかにする。「化学変化とその量的関係」については、化学変化を起こす物質の量の間には一定の関係があり、その関係はモルで理解できることを扱う」と記している。このような解説理科編の表記の仕方について、佐野⁽³⁶⁾は、「この表現は「物質」として国際単位系（SI）の定義を採用しているのかどうかがいまいであり、モルとは粒子数を表すものとも解釈できる文である」と述べている。佐野⁽³⁷⁾は同じ論考の「はじめに」において、「国際単位系（SI）において、質量でもなく数でもない「物質」（amount of substance）という新しい量が定義されmolはこの量の単位と決定された」と記していることから、粒子の単位としている国際単位系（SI）の定義を誤解していたのではないと思われる。そのため、国際度量衡総会の定義に沿って説明している学習指導要領解説理科編の、「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」という記述を、「モルとは粒子数を表すものとも解釈できる文である」と批判したのではないかと推察される。片平・高野・長洲⁽³⁸⁾は、理科Iの教科書に記述されたモルの定義を分析し、11社18種類のうち、国際単位系（SI）に即した一義的なモルの定義は、4社4種類の教科書にしか確認できなかったことや、単位としてのモルの扱いが不十分であったことを指摘している。

平成元年度告示の高等学校学習指導要領解説理科編⁽³⁹⁾の化学I B及び化学IIでは、「物質の量を示す概念として、物質とその単位の「モル」を導入し、物質の化学変化における量的な関係について理解させる。」と記されており、モルが粒子数に基づく量の表し方であることには触れていない。平成10年度告示の高等学校学習指導要領解説理科編⁽⁴⁰⁾の化学Iでは「物質については、物質の量を示す概念として、物質とその単位の「モル」を導入し、原子、分子、イオンの質量の相対的な値である原子量、分子量、化学式量と物質との関係を扱う。また、化学式及び化学反応式と関連させて化学変化を起こす物質の量の間には一定の関係があることを扱う。モル質量やモル濃度にも触れる」と記され、平成元年度告示の学習指導要領解説編と同様に、モルが粒子の数に基づく量の表し方であることには触れていない。平成20年度告示の高等学校学習指導要領解説理科編⁽⁴¹⁾の化学基礎では「粒子の数に基づく量の表し方である物質の概念を導入し、物質と質量や気体の体積との関係について理解させることがねらいである。」と記され、物質が粒子の数に基づく量の表し方であり、その単位が「モル」であることを明確に読み取れる記述となった。平成30年度告示の高等学校学習指導要領解説理科編⁽⁴²⁾の化学基礎における物質に関する説明は、平成20年度告示の内容と全く同一で、物質が粒子の数に基づく量の表し方で、その単位が「モル」であることが明確に記されている。

平成20年度告示及び平成30年度告示の高等学校学習指導要領解説理科編におけるモル（mol）の解説に加えて、国際度量衡総会における物質（mol）の再定義により、長きに渡る、モル（mol）とは何の単位かという定義に関わる議論に終止符が打たれ、物質という粒子の数に基づく量の表し方をどのように理解させるかという、具体的な授業改善の手立てを検討し実践で検証する新しい局面に入ったと言えよう。

6 化学における物質質量 (mol) の有用性

化学反応は、さまざまな種類の原子や分子が、互いに結びついたり離れたりすることである。例えば、水素と酸素が反応して水が生じる化学反応は、水素原子 (H) 2個からなる水素分子2個と酸素原子 (O) 2個でできている酸素分子1個が反応して、水素原子2個と酸素原子1個からなる水分子2個ができるというように、質量や体積よりも原子や分子の個数で表した方が便利である。このような化学反応の過程を表現した化学反応式等における係数は、原子や分子などの粒子数を表すことを、中学校の理科で学んでおり、物質の量を原子や分子などの個数で捉える物質質量 (mol) の基礎となる知識を習得している。ただし、物質を実験等で扱う際、粒子の数を直接計測することは困難であることから、計測可能な質量や体積等、他の量に換算して取り扱うのが妥当である。原子量、分子量はそれぞれ原子1個、分子1個の質量の比を表す数値であるから、原子量、分子量にグラムをつけた量をとればそれぞれの原子数、分子数は皆同じになる。実測の結果、明らかになった 6.02×10^{23} 個の集まりを1モルと定義し、これを質量に換算すれば、原子、分子、イオンの各集団についてそれぞれ原子量、分子量、イオン量にグラムをつけた質量に相当する。また気体の体積に換算すれば、0℃、1気圧で22.4 Lである。

モル質量 M (g/mol) の物質、 n (mol) の質量が w (g)、体積が0℃、 1.01×10^5 Pa (1 atm) で v (L)、含まれる粒子数が x のとき、アボガドロ定数を N_A (mol^{-1}) とすると、図5に示した関係式が成り立つ。このように、物質質量 (mol) は原子や分子などの粒子の個数、質量、気体の体積の関係を結びつける便利な単位である⁽⁴³⁾。モル質量は、質量 (g) を物質質量 (mol) で除す代数式で定義されるので、モル質量の単位は (g/mol) となる。また、モル体積は、気体の体積 (L) を物質質量 (mol) で除す代数式で定義されるので、モル体積の単位は (L/mol) となる。このように、SI組立単位の記号は基本単位の記号を分数の形で表した代数式で与えられる。代数式で表された物質質量と質量・粒子数・気体の体積の量的関係を理解するためには、SI組立単位の基本的な考え方の指導も必要であると考えられる。

7 中学校と高等学校の化学の学習における量的な関係を接続する「関数的な見方・考え方」

7.1 高等学校学習指導要領理科解説編における「量的関係」の捉え方

平成30年告示の高等学校学習指導要領理科解説編の化学基礎では、物質質量について、「物質質量と粒子数、質量、気体の体積との関係について理解させること」、化学反応式については、「化学反応に関する実験などを行い、化学反応式が化学反応に関与する物質とその量的関係を表すことを見いだして理解させること⁽⁴⁴⁾」と記されている。

ここで大切なことは、第2節で述べたように、炭酸カルシウムと塩酸を反応させる実験や炭酸水素ナトリウムの熱分解などの実験を通して、化学反応式の係数の比が、反応物と生成物の質量の比を表しているのではなく、物質質量の比を表していることに気付かせて理解させることである。その上で、実験を通して実感を持って理解した物質質量 n (mol) を介して、反応に関与する物質の質量や体積の間の量的関係が、粒子数 x 、質量 w 、体積 v の示量変数やアボガドロ定数 N_A の代数式で一般化でき、それらが相互に変換できることを理解させることが大切である。物質質量 (mol) やモル質量などの代数式による定義の理解や式の変換が自在に行えるようにすることが、粒子数で物質の量を表すことの有用性とその理解につながるものと考えている。つまり、代数式による定義や概念の理解及び式の変換の運用は、密接に関わり合っており、これらを総合的に理解させることが重要であると考えられる。なお、誤解のないように強調しておくが、概念の理解を伴わない代数式の暗記や、式の変換の計算練習を勧めているのではない。

K社の化学基礎の教科書⁽⁴⁵⁾では、物質質量 (mol) と質量、粒子数、気体の体積の関係を、比による量的関係として代数式を用いて構造的に示している (図6)。図6に示された代数式は、算数で学んだ「比の三用法」で換算できる極めて単純なものであるが、生徒には理解しにくいようである。指導に当たっては、化学変化における量的な関係について、「2つの量的な変数の関係を比や割合で捉えられそうか」(表1) の見方・考え方を働かせられるよう指導したり、算数で学んだ「比の三用法」を具体例とともに想起させることで、理解を支援したりすることができるのではないかと考える。

筆者らは、事象を比や割合で捉える見方・考え方を、「関数的な見方・考え方」として捉えている。次に、化学基礎の学習の基礎となる中学校の化学変化の学習において働く「関数的な見方・考え方」について述べる。

$$w \text{ (g)} = M \text{ (g/mol)} \times n \text{ (mol)}$$

$$M \text{ (g/mol)} = \frac{w \text{ (g)}}{n \text{ (mol)}} \qquad n \text{ (mol)} = \frac{w \text{ (g)}}{M \text{ (g/mol)}}$$

$$v \text{ (L)} = 22.4 \text{ (L/mol)} \times n \text{ (mol)} \qquad n \text{ (mol)} = \frac{v \text{ (L)}}{22.4 \text{ (L/mol)}}$$

$$x = N_A \text{ (/mol)} \times n \text{ (mol)} \qquad n \text{ (mol)} = \frac{x}{N_A \text{ (/mol)}}$$

図5 モル質量 M (g/mol) の物質, n (mol) の質量が w (g), 体積が v (L), 含まれる粒子数が x のとき, アボガド定数を N_A (/mol) とする関係式

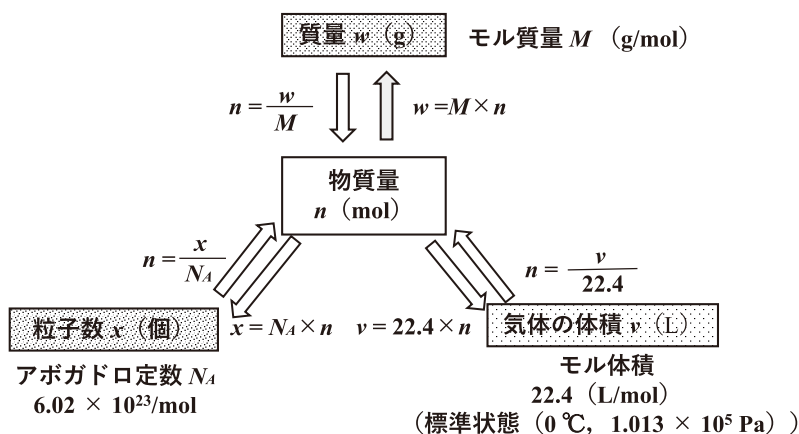


図6 物質と質量・粒子数・気体の体積の関係 (「化学基礎」(啓林館, 2018) を改変)

表1 「質的・量的な関係」の見方・考え方の階層的な捉え方

<p>質的・量的な関係</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 事物・現象を質的, 量的のいずれで捉えられそうか ・ 2つの変数の間に関係性がありそうか (質的な変数と質的な変数, 質的な変数と量的な変数, 量的な変数と量的な変数) ・ 2つの量的な変数の関係を比や割合で捉えられそうか ・ 2つの量的な変数を座標平面で可視化して関係性を捉えられそうか (散布図, グラフなど) ・ 2つの量的な変数の関係は, どのような関数で表現できそうか ・ 座標平面で分解したベクトルの量的な関係を, 三角比でどのように捉えられそうか ・ 質的・量的な関係はどのようなモデル (粒子, 数式など) で説明できそうか, など

7. 2 中学校の化学変化における質量の量的関係の「関数的な見方・考え方」による捉え方

中学校第2学年の, 化学反応に参与する物質間の質量の割合は, 常に一定であるという法則を見いださせる学習を例に述べる。この学習では, 化学変化に関係する物質の質量を測定する実験を行い, 反応する物質の質量の間には, 一定の関係があることを見いだして理解させることをねらいとしている。具体的には, 銅やマグネシウムなどの金属とそれに反応する酸素の質量との関係を調べる実験が例示されている。金属の質量と生じた化合物の質量との間には比例関係が認められる。また, 金属の質量と化合した酸素の質量との間にも比例関係が認められる。この比例関係における独立変数 (x) は金属の質量であり, 従属変数 (y) は化合物の質量や化合した酸素の質量である。

この実験について、理科の見方・考え方の一つである「質的・量的な関係」の見方・考え方を、学習内容や実験の内容に照らし合わせて設定した『質的・量的な関係』の見方・考え方の階層的な捉え方(表1)のいずれを働かせて取り組ませることができるかについて述べる。まず、最初は定性的な実験か、それとも定量的な実験かを判断する必要がある。その際には、「事物・現象を質的、量的のいずれで捉えられそうか」を働かせることが考えられる。次に、どの変数とどの変数の関係を定量的に調べるのかについて考える際には、「2つの変数の間に関係性がありそうか(質的な変数と質的な変数, 質的な変数と量的な変数, 量的な変数と量的な変数)」を働かせることが考えられる。そして、実験結果の分析や解釈をしたり考察したりする場面では、「2つの量的な変数の関係を比や割合で捉えられそうか」「2つの量的な変数を座標平面で可視化して関係性を捉えられそうか(散布図, グラフなど)」「2つの量的な変数の関係は、どのような関数で表現できそうか」を働かせることが考えられる。これらの見方・考え方は、理科と数学に共通した「関数的な見方・考え方」である。

互いに反応する金属と酸素の質量の比が一定であるという量的な関係は、算数・数学で用いられる「連続量÷連続量」という内包量の基本的な形態をとる。内包量は、その教授が難しいことが従来から指摘されている。二つの量の関係が比例の関係にあることは、一つの量の変化に対するもう一つの量の変化の割合が一定であることを比例定数として導出して見いだすことになる。このようにして導出される比例定数は内包量である。この実験の結果についての分析や解釈において大切なことは、二つの量の関係について、内包量としての比例定数を導出することを通して、互いに反応する金属と酸素の質量の比が一定であるという関係を見いだし理解することである(図7)。

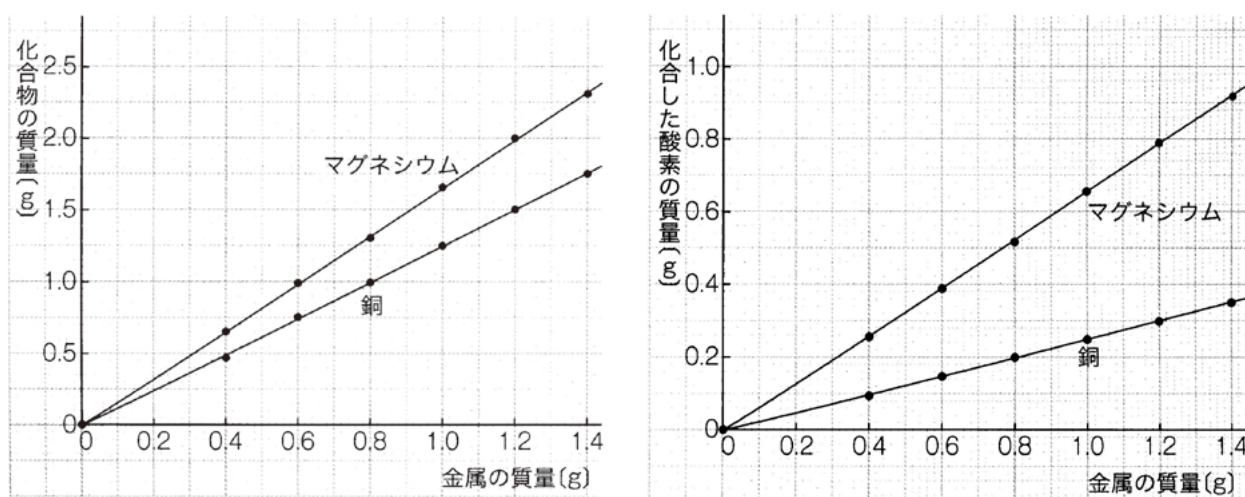


図7 金属の質量と化合物の質量の関係(左)と金属の質量と化合した酸素の質量の関係(右)
(「新しい科学 2年」(東京書籍, 2012)より転載)

8 モル (mol) 等の示量変数の概念的理解

8.1 除法の性質と比の三用法

平成29年告示の小学校学習指導要領算数解説編によると、第4学年では、「A 数と計算」の「整数の除法」において、除法に関して成り立つ性質として、「除数及び被除数に同じ数をかけても、同じ数で割っても商は変わらない⁽⁴⁶⁾」ことを学習する。これを式で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 &a \div b = c \text{ のとき,} \\
 &(a \times m) \div (b \times m) = c \\
 &(a \div m) \div (b \div m) = c
 \end{aligned}$$

さらに、第4学年では、二つの数量の組について、基準量をそれぞれ決め、基準量を1とみたときに、比較量がどれだけ当たるかを、割合を用いて比べることを学習する。

第5学年では、距離と時間など異種の二つの量の割合として捉えられる速さなどの数量があることを学習する(表2)。つまり、二つの数量のうち一方を基準にする大きさ(基準量)としたときに、もう一方の数量(比較量)がどれだけに相当するのかを、比較量を基準量で割った商(割合)で比べられることを学ぶ。第6学年では、比の意味や $a:b$ という比の表し方や、 a/b を $a:b$ の比の値ということや、比の値を用いると比の相等(等しい比)を確かめることができることなどを学習する。

二つの量を割合で比べるには、どちらかの数量をもと(基準量)にして考えなければならない。このとき、もとにする量(基準量)に対して、他の数量を、比べる量(比較量)という。つまり、比べる量(比較量)を、もとにする量(基準量)で除した値が比の値であり割合である。比べる量と、もとにする量の二つの量の割合の関係から、次の三つの式が成り立つ。一つは、「割合=比べる量÷もとにする量」で表される式で、この式を比の第一用法という。二つは、「比べる量=もとにする量×割合」で表される式で、この式を比の第二用法という。三つは、「もとにする量=比べる量÷割合」で表される式で、比の第三用法という。速さは、距離と時間の異種の二つの量の割合として捉えたものである。比の三用法を用いれば、二つの既知の量からもう一つの未知の量を求めることができる。

このような知識・技能は、中学校理科の密度や電気抵抗等の学習だけでなく、高等学校の化学において指導や生徒の理解が困難と言われている物質質量(mol)の基礎となるものであり極めて重要である。物質質量(mol)と原子や分子などの粒子数、質量、気体の体積との関係を表す代数式を変換する際にも、小学校で学んだ「比の三用法」や「除数及び被除数に同じ数をかけても、同じ数で割っても商は変わらない」という除法に関して成り立つ性質を活用することになる(表3)。物質質量(n)がモル質量(M)に対する質量(w)の比、アボガドロ定数(N_A)に対する粒子数(x)の比、モル体積(22.4)に対する気体の体積(v)の比として表されることは、小学校の算数で学んだことを活用すれば理解できる。生徒の実態によっては、小学校で学んだ算数を想起させることも必要であろう。

8.2 外延量・内包量と示量変数・示強変数

物理学や化学で扱う物理量には、体積、質量、物質質量等、物質の量に比例する示量変数と温度、圧力、密度、濃度等、物質の量に依存しない示強変数とがある⁽⁴⁷⁾。体積、質量、物質質量等の示量変数は、ある平衡状態に達している系の一部を半分に切り取ったときに半分になる。それに対して、温度、圧力、密度、濃度等の示強変数は、系を半分の大きさに切り取っても、もとの量が保存される。つまり、加え合わせても意味のない量である。

一方、算数・数学教育においては、銀林⁽⁴⁸⁾や遠山⁽⁴⁹⁾が算数・数学教育のために考案した外延量と内包量という概念がある。外延量は、質量、長さ、体積等同じ種類で加え合わせることでできる量である。それに対して、内包量は温度、濃度、速度等のように、加え合わせても意味のない量である。算数の比例や数学の一次関数の学習においても、また理科における物体の体積に対する質量の比で表される密度や電流の値に対する電圧の値の比で表される電気抵抗など、グラフにおける x 軸の変化量に対する y 軸の変化量の比として得られる値も内包量といえる。

英語による表記をみると、物理学で用いられる示量変数はextensive variable、示強変数はintensive variableと表記される。他方、算数・数学教育で用いられる外延量はextensive quantity、内包量はintensive quantityと表記される(Greer⁽⁵⁰⁾)。外延量と内包量の概念は、理科教育の立場としては示量変数(extensive variable)・示強変数(intensive variable)と同義語として捉えて問題はないと考える。

中学校第2学年の理科で学習する定比例の法則を外延量と内包量の視点で見してみる。平成20年告示の中学校学習指導要領理科の解説編では、「金属の質量を変えて酸化させる実験を行い、結果をグラフ化し、金属の質量と反応する酸素の質量との比を見いださせるようにする⁽⁵¹⁾」と記されている。T社の教科書⁽⁵²⁾では、マグネシウムと銅の粉末の質量を変えて酸化させる実験を行い、測定した結果を表やグラフにして分析・解釈を行い、それぞれの金属の質量と反応する酸素の質量との比の値が一定していることを見いださせるよう構成されている。金属の質量も酸素の質量も外延量である。金属の質量に対する化合した酸素の質量の比の値は一定であり、内包量である。この学習は、小学校と中学校の接続と算数・数学との教科等横断的な学習の視点から、外延量と内包量の概念を用いる学習として位置付けられるものとする。

高等学校においては、小学校や中学校の学習内容に比べ高度になり、物理学や化学の学問的な色彩が強くなる。したがって、高等学校における物理や化学の学習においては、示量変数や示強変数という用語は用いないまでも、教員はその概念を念頭に置いて指導する必要があるのではないかと考える。

表2 中学校理科の密度・抵抗等の理解の基礎となる小学校算数の比の三用法

量	速さ (v)・距離 (s)・ 時間 (t)	密度 (ρ)・質量 (m)・ 体積 (v)	抵抗 (R)・電圧 (E)・ 電流 (I)
比の 第一用法	$v = \frac{s}{t}$ 比較量：距離 (s) 基準量：時間 (t)	$\rho = \frac{m}{v}$ 比較量：質量 (m) 基準量：体積 (v)	$R = \frac{E}{I}$ 比較量：電圧 (E) 基準量：電流 (I)
比の 第二用法	$s = vt$	$m = \rho v$	$E = IR$
比の 第三用法	$t = \frac{s}{v}$	$v = \frac{m}{\rho}$	$I = \frac{E}{R}$

表3 物質質量と質量・粒子数・気体の体積の関係式及び比の三用法による変換

量	物質質量 (n)・質量 (w)・ モル質量 (M)	物質質量 (n)・粒子数 (x)・ アボガドロ定数 (N_A)	物質質量 (n)・気体の体積 (v)・ モル体積 (22.4)
比の 第一用法	$n = \frac{w}{M}$ 比較量：質量 (w) 基準量：モル質量 (M)	$n = \frac{x}{N_A}$ 比較量：粒子数 (x) 基準量：アボガドロ定数 (N_A)	$n = \frac{v}{22.4}$ 比較量：気体の体積 (v) 基準量：モル体積 (22.4)
比の 第二用法	$w = Mn$	$x = N_A n$	$v = 22.4 n$
比の 第三用法	$M = \frac{w}{n}$	$N_A = \frac{x}{n}$	$22.4 = \frac{v}{n}$

9 高等学校の化学における化学変化の量的関係に関わる諸概念の構造

先述したように、堀⁽⁵³⁾は、高等学校の生徒がモル概念を理解することの難しさの一つはモル概念に関わる基礎的概念の多様性にあり、多くの概念が構造化されて構成されていると述べている。また、生徒がモル概念を理解するためには、まずそれぞれの概念を適切に理解する必要があり、その上に立って、これらの基礎的・基本的概念の一つひとつの構造的な関連性をつかみ、はじめてモル概念が理解できるようになると考えられると述べている。

そこで、平成30年告示の高等学校学習指導要領解説理科編で述べられている、「化学反応式が化学反応に関与する物質とその量的関係を表すことを見いだして理解させる⁽⁵⁴⁾」ことを授業で実現するためには、どのような基本的な知識や概念の理解が必要で、それらの要素がどのような構造で関わり合っているのかを検討を行い、図8のようにまとめた。図8は大きく三つの要素で構成されている。その一つは「化学反応式・イオン反応式」であり、第2節で述べた炭酸カルシウムと塩酸を反応させる実験や炭酸水素ナトリウムの熱分解の実験などの化学変化を化学反応式で理解するものである。二つ目は、化学反応式・イオン反応式や物質質量 (mol) を理解する上で重要であると判断した、原子や分子に関する基礎的な知識である。三つ目は、物質質量 (mol)、粒子数、質量、気体の体積の関係を構造的に示したものである。以下、この図について述べる。

最も基本となるのは、原子の相対質量であり、「質量数12の炭素原子¹²Cの質量を12」とし、これを基準とする相対的な値で表していることへの理解である。そして、多くの元素には同位体が存在することから、各同位体の相対質量と存在比から元素の相対質量を求め、これを原子量とよぶことへの理解である。相対質量と原子量の理解には、原子の構造に関する知識が不可欠である。

次に基本となる知識は組成式と分子式である。組成式は、物質を構成する原子の割合を最も簡単な整数比で示したものであり、分子式は分子からなる物質を構成する原子の種類とその個数で示したものである。相対質量である原子量と分子式を関係付ければ、分子を構成する元素の原子量の総和が分子量であることが理解できる。式量は、イオンやイオン結晶、金属等、イオン式や組成式で表される物質の化学式に含まれる元素の原子量の総和である。なお、原子量も分子量も相対値であることから、単位のない無次元量であることに指導上の留意が必要であろう。

物質質量 (mol) は、粒子数の単位として、「1モルは正確に $6.02214076 \times 10^{23}$ の要素粒子を含む。この数値は、単位 mol^{-1} による表現でアボガドロ定数 N_A の固定された数値であり、アボガドロ数と呼ばれる」と再定義されており、物

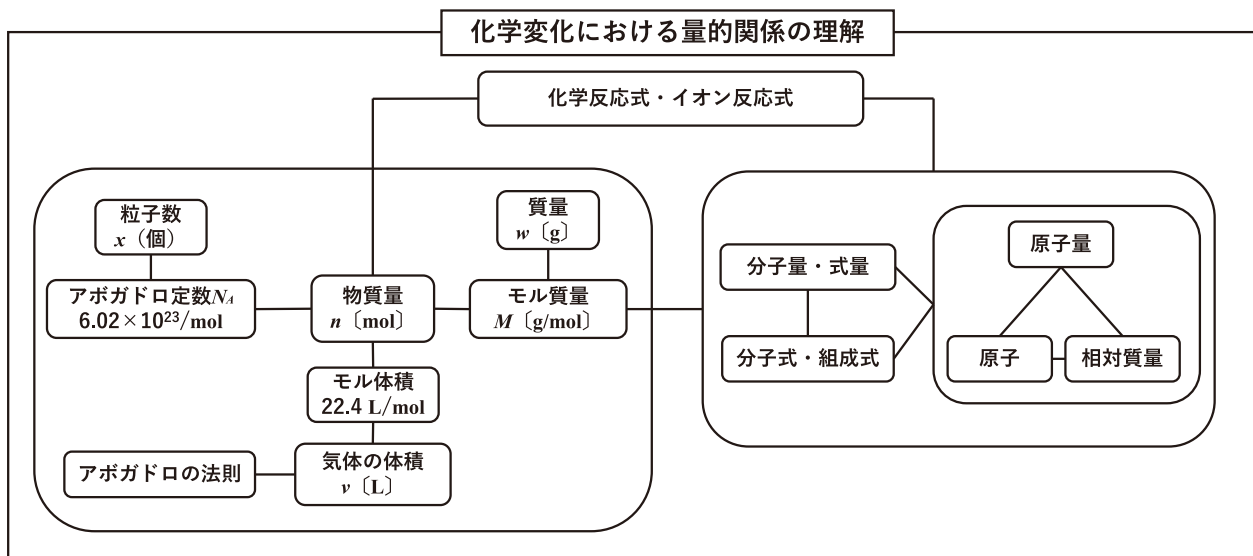


図8 化学変化の量的関係の理解に関わる主要な要素の関係

質量 n (mol) は、アボガドロ定数 N_A に対する粒子数 x 個の比で表される。モル質量は、物質 1 モルに含まれる $6.02214076 \times 10^{23}$ の要素粒子の質量であり、ある物質の分子量の数字にグラムをつけた質量に含まれる物質のことである。つまり、ある物質の原子量や分子量にグラムを付けた質量に対する任意の質量 w (g) の比で表される。単位は (g/mol) である。

モル体積は、気体 1 mol が占める体積のことであり、標準状態 (0 °C, 1.013×10^5 Pa) で、ほぼ 22.4 (L/mol) である。これは、気体の体積とその分子の数の間には、同温、同圧のもとで、全ての気体は、その種類に関係なく同体積中に同数の分子を含むというアボガドロの法則に従っている。つまり、アボガドロの法則によれば、気体 1 mol (6.02×10^{23} 個) の分子が占める体積は、気体の種類にかかわらず同じである。モル体積は、22.4 (L/mol) に対する気体の体積 v (L) の比で表される。

今井・濱中・下條⁽⁵⁵⁾は、高等学校教師を対象として、「相対質量」「アボガドロ定数」「物質質量」「モル質量」の指導の難易度について質問紙調査を行い、教員が最も指導が難しいと回答したのは「物質質量」であったとしている。また、高校生に上述の四つの内容について理解のしやすさについて問うたところ、「相対質量」と「物質質量」が「モル質量」「アボガドロ定数」よりも理解しにくいと回答したという。

高等学校化学における化学変化の量的関係の理解に関わる基礎的な知識や概念は、相互に密接に関係している。「相対質量」「物質質量」「モル質量」「アボガドロ定数」等を関連付け、構造的な理解を図れる指導が重要である。その際、先述したようにモル質量の単位は (g/mol)、モル体積の単位は (L/mol) で表される等、単位は国際単位系 (SI) の基本単位を組み合わせることもあわせて指導する必要がある。

10 おわりに

本論では、化学反応における量的関係を理解する上で重要な概念となる物質質量 (mol) を取り上げた。物質質量 (mol) は国際単位系 (SI) の一つとして、国際度量衡総会において定義された物理量である。当初、物質質量 (mol) は質量と関連付けて定義されていたが、2019年から質量から完全に切り離され、物質の量を粒子数で表す単位とする再定義が発効している。

高等学校の理科に物質質量 (mol) が導入されたのは、昭和53年告示の高等学校学習指導要領の理科 I からであるが、高等学校の生徒には理解が難しいとされてきた。しかし、再定義された物質質量 (mol) は、質量とは関係なく単純に、アボガドロ定数に対する粒子数の比の代数式の関係として捉えれば良いことから、従来よりも指導は容易になるものと思われる。

そこで、まず平成30年告示の高等学校学習指導要領理科の化学基礎で求められている、「化学反応式の係数の比が化学反応における物質質量の比を表すこと」を見いだして理解させる授業のモデルについて述べた。次に、モルの導入

やその定義に関する議論及び高等学校学習指導要領理科での取扱いの変遷を振り返り、長きに渡ってモルの捉え方が混乱していた事実を整理して述べた。さらに、国際度量衡総会において、質量と関連付けられていた物質質量 (mol) の定義が、質量から切り離されて、粒子の数に基づく物質の量の表し方として再定義されたことを述べた。そして、これらを受けて、高等学校生徒に物質質量 (mol) の定義を代数式で理解できるようにするためには、小学校、中学校、高等学校の接続及び、算数・数学と理科との教科等横断的な学習指導の観点から、「関数的な見方・考え方」の一つである「比の見方・考え方」を働かせられるよう学習指導を行うことが大切であることを提案的に述べた。

付記

本研究の一部は、JSPS科研費18K02655の助成を受けたものである。

引用文献

- (1) 樋口大成 (1963) グラム原子・グラム分子の定義 高等学校39年度用・化学Bの教科書に見られる定義の比較と、その批判, 化学教育, 11(3), pp.353-356.
- (2) 岩崎精治 (1964) 高等学校改訂教科書におけるモルの取り扱い, 化学教育, 12(1), pp.101-104.
- (3) 文部省 (1979) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」実教出版, p.101.
- (4) 佐野俊介 (1983) 高校理科I教科書における「物質質量」について, 化学教育, 31(1), pp.60-61.
- (5) 片平克弘・高野雄・長洲南海男 (1987) モル概念の定義と必要性に関する教科書記述の分析および生徒の意識調査ーモル概念指導のための基礎的資料としてー, 日本理科教育学会研究紀要, 28(1), pp.27-34.
- (6) 今井泉・下條隆嗣 (2004) 物質質量 (モル) 概念の変遷とその高校化学への影響ー物質質量についての歴史的背景から見た教育的問題点ー, 科学教育研究, 28(3), pp.149-157.
- (7) 森川鐵朗 (2003) 「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), pp.142-143.
- (8) 岸田功 (2003) モルは物理量ではない!! , 化学と教育, 51(10), pp.633-634.
- (9) 産業技術総合研究所 (2020) 「国際文書第9版 国際単位系 (SI) 日本語版」, p.102.
- (10) 山田久美 (2018) 「Newton別冊 単位と法則 新装版」ニュートンプレス, pp.8-9.
- (11) 蓑手重國 (1994) 高校化学「モル」学習でのつまづきの原因とその解消の方法, 化学と教育, 42(1), pp.14-18.
- (12) 田村健治 (1998) 魅力的で理解しやすい授業展開の開発 (I)ー単位の取り扱いと物質質量 (モル) の単元の指導ー, 化学と教育, 46(11), pp.744-745.
- (13) 広瀬庄一・森川鐵朗 (2000) 化学教育における物質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), pp.752-755.
- (14) 石井菊次郎 (2002) 物質質量・mol・アボガドロ定数再考, 化学と教育, 50(4), pp.333-334.
- (15) 松浦良武・片平克彦 (2002) モル概念獲得のためのモル単元の導入に関する一考察ー「物質質量」の単位であるモルの定義と生徒の実態を踏まえてー, 日本科学教育学会研究会報告, 16(6), pp.31-34.
- (16) 今井泉・濱中正男・下條隆嗣 (2005) 高等学校化学における物質質量 (モル) 指導の実際, 科学教育研究, 29(2), pp.173-182.
- (17) 堀哲夫 (1996) モル概念学習の問題点とモル電子天秤の導入をめぐる, 化学と教育, 44(4), pp.265-268.
- (18) 文部科学省 (2019) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」実教出版, p.92.
- (19) 前掲 (18), p.92.
- (20) 前掲 (18), p.92.
- (21) 岡村定矩・藤嶋昭 (2012) 「新しい科学 2年」東京書籍, p.28.
- (22) 後藤顕一・飯田寛志・野内頼一・西原寛・渡部智博 (2019) 「資質・能力」を育む高校化学 探究で変える授業実践, 化学同人, p.5.
- (23) Wilhelm Ostwald (1893). Hand-und Hilfsbuch zur Ausführung Physiko-Chemischer Messungen: Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, p.119.
- (24) 池田菊苗 (1904) 「近世 無機化学」東京開成館, p.305.
- (25) <https://ja.wikipedia.org/wiki/モル> (2019年3月30日閲覧)
- (26) 前掲 (9), p.102.
- (27) 渡辺正・北條博彦 (2008) 「高校で教わりたかった化学」日本評論社, p.83.
- (28) <https://www.nier.go.jp/guideline/s31hn/chap4.htm> (2020年3月30日閲覧)
- (29) 文部省 (1961) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」大日本図書, p.64.
- (30) 前掲 (1), p.353.
- (31) 前掲 (1), p.356.
- (32) 前掲 (2), p.101.

- (33) 文部省 (1972) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」東京書籍, p.38.
- (34) 前掲 (5), p.27.
- (35) 前掲 (3), p.11.
- (36) 前掲 (4), pp.60-61.
- (37) 前掲 (4), p.60.
- (38) 前掲 (5), p.27.
- (39) 文部省 (1989) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」実教出版, p.83.
- (40) 文部省 (1998) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」大日本図書, pp.96-97.
- (41) 文部科学省 (2009) 「高等学校学習指導要領解説理科編 理数編」実教出版, p.56.
- (42) 前掲 (18), p.92.
- (43) 齋藤烈・藤嶋昭 (2018) 「化学基礎 改訂版」啓林館, p.116.
- (44) 前掲 (18), p.92.
- (45) 前掲 (43), p.116.
- (46) 文部科学省 (2017) 「小学校学習指導要領解説算数編」日本文教出版, p.188.
- (47) 平野顕一 (1994) 「日本大百科全書12」小学館, pp.42-43.
- (48) 銀林浩 (1957) 「量の世界・構造主義的分析」むぎ書房, p.101.
- (49) 遠山啓 (1966) 「関数の指導 中学校編」明治図書, pp.24-25.
- (50) Brian Greer (1992). Multiplication and Division as Models of Situations. In D.A.Grouws (Ed.), *Handbook of research on mathematics teaching and learning: A Project of the National Council of Teachers of Mathematics*, Macmillan Publishing Company, pp.276-295.
- (51) 文部科学省 (2008) 「中学校学習指導要領解説理科編」大日本図書, p.43.
- (52) 前掲 (21), pp.52-55.
- (53) 前掲 (17), p.266.
- (54) 前掲 (18), p.92.
- (55) 前掲 (16), pp.173-182.

Learning about Amount of Substance (mol) to Understand Quantitative Relations in Chemical Change: Adopting a Ratio Perspective to Improve Lessons

Takayuki YAMADA* · Takayuki MATSUMOTO** · Kenichi GOTO***
Yoshihiko INADA**** · Masakazu OKAZAKI***** · Tatsushi KOBAYASHI*****

ABSTRACT

This paper focused on the amount of substance (moles or mol), which is an important concept for understanding quantitative relations in chemical reactions. It is defined by the International Conference on Weights and Measures as a physical quantity that is a part of the International System of Units (SI). It was initially described in relation to mass; however, since 2019, the two have been completely separated, and the amount of substance was redefined as a unit that expresses the number of particles. Although it was introduced in high school Science in 1978, high school students had difficulty in understanding the topic. However, because its redefinition can be simply understood as the relation between the algebraic expression of the particle number ratio and the Avogadro constant regardless of mass, teaching the concept would seem easier than before. Therefore, chemistry basics were introduced to high school Science in 2018: I described the model of the lesson to find and understand that “the ratio of the coefficients of the chemical reaction formula represents the ratio of the amount of substance in the chemical reaction”. The introduction discussed the definition of moles and the relevant study transition in high school and found that the said concept has been wrongly understood for a long time. Hence, to facilitate high school students’ understanding of the amount of substance by algebraic expressions, it is necessary to link elementary schools, lower secondary schools, and high schools and incorporate subjects such as Arithmetics/Mathematics and Science. From an effective learning guidance standpoint, students need to obtain learning support so that they can practice the “viewpoints/thinking of ratio,” which is one of the “functional viewpoints/thinking.”

* Natural and Living Science ** Master Course (School Education) *** Toyo University
**** Okayama University ***** Okayama University of Science