

物質質量(mol)に関する生徒の認識の実態と概念理解

所属コース 教科領域コース
氏名 窪 航平
指導教員 隅田 学 掛水高志

【概要】

本研究は高等学校化学において、物質質量(mol)に関する生徒の認識や誤概念を調査するとともに、計算方法に着目し、化学計算を行う上での困難さを解明することを目的とした。大学生 83(77)名を対象に物質質量に関する簡単な問題、それぞれの物理量の定義を自由記述で問う問題、身の回りにある数をワンセットとして考えているものを例示する問題という3つのセクションで構成された設問(設問①)、Fraser(2012)が行った計算方法を類似させた数学の問題と化学の問題で構成された設問(設問②)の二つをGoogle フォームで実施した。その結果によると、設問①では構成分子の原子数が体積に影響するという誤概念や温度や圧力に関係なく1 molの体積を22.4 Lであると考えた誤概念を形成していることが分かった。設問②では生徒が化学における計算問題を行う際に、大きな数の取り扱いや化学的概念の理解不足が計算ミスにつながっている可能性と数学を化学の教科横断的な指導が効果的である可能性が示唆された。

キーワード 高校化学 物質質量 モル 誤概念 理科教育 計算

I 問題の所在

物質質量(amount of substance)という概念は現代の化学で重要な位置を占め、化学反応における量的関係を理解するために必要とされる。しかし、森川ら(2004)によると、物質質量とモルは、高等化学の学習者にとって第一の隘路であり、化学嫌いの始まる原因でもあると述べられており、物質質量の単元を理解できるかどうか、化学の好き嫌いにも関わってくると言える。また、物質質量という概念は化学基礎「物質質量と化学反応式」で登場し、その後の「酸と塩基の反応」「酸化還元反応」でも物質質量という概念を使用する。また、発展科目である化学でも物質質量という概念はなくてはならないものであり、高等学校化学の学習者にとっては避けては通れない概念であると言える。しかし、今井(2005)によると、高等学校教師に対しての調査で、高等学校教員が「物質質量」を指導困難な内容と考えているという報告をしている。また、高校一年生に対する調査でも、理解しにくい学習内容として「物質質量」をあげている。

私自身、高校での授業を行う中で、物質質量(mol)に関する学習において、生徒に基礎的な数学的能力が不足していると感じることがある。基礎的な数学的能力の理解不足は物質質量のような概念の学習だけでなく、化学基礎・化学全体の理解不足につながる可能性がある重大な問題であろう。Fraser(2012)は、化学計算を行う上で、基礎的な数学的能力不足がミスにつながっていることを明らかにしている。化学において、物質質量のような基礎的な概念を学ぶ際に、関連する計算問題の難しさを計算方法の観点から解明することは、生徒の

化学の概念的理解の定着や指導法の開発に有益であると考える。

これらのことから、物質量(mol)に関する生徒の認識の実態と誤概念について、質問紙法による調査結果から明らかになった内容を報告するとともに、化学における計算問題の難しさの解明を目的とした。

II 研究の方法

本研究では、国立大学生を対象に二つの調査を Google フォームを用いて実施した。物質量に関する簡単な問題、定義を自由記述で問う問題、身の回りにあるある数をワンセットとして考えているものを例示する問題という 3 つのセクションで構成された設問 (= 設問①) と主に Fraser (2012) が行った計算方法を類似させた数学の問題と化学の問題で構成された設問 (= 設問②) である。問題については巻末資料 1, 2 に示している。

1 対象

国立大学の理科教員志望の学生(教育学部, 理学部, 農学部, 工学部)に対して, 設問①と設問②を Google フォームを用いて実施した。設問①は 77 名, 設問②は 88 名の学生に対し調査を行った。設問①は 2020 年 12 月、設問②は 2021 年 7 月に調査を行った。

2 質問内容について

(A) 設問①

物質量と粒子数, 質量, 体積との関係を問う問題や, モル質量とアボガドロ数から原子一個の重さを求める問題などを選択肢形式で設けた。また, 問題の正答率と定義の理解度の関係を調べるという意図で, 「物質量, 原子量, モル質量, モル濃度について定義を自分なりの言葉で説明してください」という自由記述の問題を設けた。物質量の 6.0×10^{23} という数をワンセットとして考えるという指導を行う際に, 「ダース(12 個)」というような例をあげることが多い。しかし, 「ダース」という例は高校生の日常生活の中であまり使うことがなく, あまり身近でないと考える。そこで, 「身の回りで, ある数をワンセットとして考えているものの例を 3 つ挙げてください。(例: 1 ダース(12 個), 1 クラス(40 人))」という自由記述の質問を設け, 生徒にとって身近にある数を束ねる単位とは何かを調査した。

(B) 設問②

3 セクションで構成されており, 1) 計算問題のセクション, 2) 化学の問題と数学の問題の関連性を問うセクション, 3) 指定した問題と計算方法が類似している問題を作問させるセクションである。計算問題に関するセクションは, Fraser (2012) が行った調査を参考に, 計算方法を類似させた化学と数学の問題を, 化学 8 問, 数学 5 問の計 13 問で構成して本研究で独自に作成した(表 1)。化学の問題と数学の問題の関連性を問うセクションは, 「それぞれの化学の問題と計算方法が類似していると思う数学の問題を選んでください」「類似する問題を比較した場合, 化学の問題と数学の問題のどちらが難しかったですか?」の 2 問で構成されている。指定した問題と計算方法が類似している問題を作問させるセクションでは, 数学の問題(B)(D)(E)について, 計算方法が類似する化学の問題を回答者に作成させた。

Ⅲ 結果と考察

1 設問①

②, ④, ⑦, ⑧では90%を超える正答率が得られた。③, ⑤, ⑥, ⑨, ⑩では正答率が90%を下回った。それらの問題を中心に、考察を行うが、⑤に関しては問題文の選択肢の順序と、回答欄の順序が合っていないために、回答率が下がっていると考えられるため、考察からは除外した。すべての問題の選択肢ごとの回答割合は、巻末資料3として示している。ここから、特徴的な解答が得られた問題について考察する。

③「CO₂とN₂, それぞれ1 molの体積を求めよ」(図1)について

90%近くの生徒が22.4 Lと答えているが、同一の生徒2名がCO₂に関して67.2 L, N₂に関して44.8 Lと答えていた。これは、標準状態において1 molの気体の体積は、その種類に関係なく22.4 Lであるという、アボガドロの法則に基づく関係を理解できておらず、気体の種類(構成原子の数)が、気体の体積に影響を及ぼすという誤概念を形成している生徒がいることがわかった。

また、今回問題文に「標準状態の」という文言を加えていないにもかかわらず、22.4 Lとほとんどの生徒が答えていることから、温度や圧力に関係なく1 molの体積は22.4 Lと考えている生徒が多くいる可能性もある。

⑥「純水500 mLに水酸化ナトリウムNaOHを0.3 mol溶かした場合、この溶液のモル濃度はいくらか」(図2)について

正答率が86.4%と低くなっており、0.15 mol/Lと誤答した生徒が11.4%いた。この誤答に関しては、500 mLを2倍すると1 Lになるという関係から「2」という値をもとめ、 $0.3 \text{ mol} \div 2$ の計算をしていると予測できる。この結果から、モル濃度を「1 Lの中にどれだけの物質質量を含んでいるか」という定義を活用できていない生徒が多く存在している事がわかる。また、計算を機械的に行っており、深い理解ができていない可能性も示唆される。

⑨Aさんは中和反応の実験をするために、0.5 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液が100 mL 必要です。0.5 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を100 mL 作るためには、何グラムの水酸化ナトリウムが必要か? H=1, O=16, Na=23 とする。

回答率が80.5%と低くなっていた。この問題は、文脈を持たせた問題であり、読解力に問題がある可能性がある。また、モル濃度から物質質量へ、物質質量から質量へという、二段階の返変換が求められるため回答率が下がっていると考えられる。また、誤答では4 gという回答と、20 gという回答が多くなっている。4 gに関しては、NaClの物質質量40に $100 \text{ mL} / 1000 \text{ mL} = 0.1$ の0.1を掛けた値を算出している可能性があり、20 gに関してはNaClの物質質量40にモル濃度0.5 mol/Lの0.5を掛けた値を算出しているという可能性がある。この結果から、前問同様、機械的に計算をしているという可能性がある。

⑩「ある原子(モル質量X)の原子1個を表す式はどのようになりますか。(アボガドロ定数をNとする)」(図3)について

正答率が77.0%と低い結果となった。この誤答の可能性として二つの事が考えられる。

一つ目はアボガドロ定数が 1 mol の粒子数 (6.02×10^{23}) である事を知らない可能性、二つ目はアボガドロ定数、モル質量について理解できているにも関わらず、粒子数と質量のイメージが結びつけられていない可能性である。

自由記述の内容について

「物質量，原子量，モル質量，モル濃度」の定義については，物質量に関しては，「粒子の数，mol を単位としてもつもの， 6.0×10^{23} 個の粒子の集まり」といった回答が多かった。原子量に関しては「炭素を基準として表した原子の質量，原子 1 mol の質量」といった回答が多かった。モル質量に関しては「1 mol あたりの質量」といった回答，モル濃度に関しては「1 L に含まれる物質量」という回答がほとんどだった。


「身の回りで，ある数をワンセットとして考えている物の例を挙げて下さい」という問いに対しては，クラス(11人)，卵，足(9人)，パック(7人)，カートン，ケース，チーム(6人)というような解答が目立った。物質量の指導をする際に「数を束ねる単位」の例として，さまざまな物が用いられているが，これらの例を示すと生徒がイメージしやすいということがわかった。

2 設問②

化学の問題と計算方法が類似している数学の問題を選択させた結果を表 1 に示す。この結果から，ほとんどの大学生が化学の問題と数学の問題を対応させることができている。また，数学(B)(D)(E)の問題と類似した，化学の問題を作成させた際の，大学生の作問の一例を表 2 に示す。これを見ると，数学(B)(D)(E)すべてにおいて，同様の計算方法を用いる化学の計算問題を作成できていることがわかる。このことから，計算方法の類似性を正しく認識できていることがわかる。

表 1：化学の問題に対応する数学の問題を選択させた結果 (n=77)

	化学(1)	化学(2)	化学(3)	化学(4)	化学(5)	化学(6)	化学(7)	化学(8)
数学 A	59	44	30	21	1	2	2	3
数学 B	15	28	39	31	4	1	6	3
数学 C	4	9	6	19	52	40	4	1
数学 D	3	2	2	10	39	53	6	4
数学 E	4	1	2	0	0	0	43	50

 = 強い類似性


 = 弱い類似性

表 2 : 数学(B)(D)(E)の問題と類似した化学の問題を作成させた際の大学生の作問の一例

数学(B)	<ul style="list-style-type: none"> ・64 グラムある酸素分子は何 mol であるか。O=16 ・12g のアンモニアを 100ml 水に溶かすと何 mol/l ですか？
数学(D)	<ul style="list-style-type: none"> ・過マンガン酸カリウムに含まれるマンガンの質量は総質量の何%ですか？ ・80 グラムの塩化水素のうち 6 グラムが水素の場合、水素の質量パーセント濃度はいくらか。
数学(E)	<ul style="list-style-type: none"> ・2 mol/l の塩酸 10ml を中和するために必要な水酸化ナトリウムは何mか？ ・メタン (CH₄) と酸素 (O₂) の存在下で燃焼すると水 (H₂O) と二酸化炭素 (CO₂) が発生する。メタンを 1 mol 発生させたとき、酸素はいくら必要になるか？

次に、対応するそれぞれの化学の問題と数学の問題の正答率を比較してその差分として整理したものが図 1 である。化学の問題(3)(4)と数学の問題 B との対応以外は、数学の問題の方が対応する化学の問題より正答率が高くなった。特に、化学(7)と数学 E の正答率の差は、35.5 %となっており、「化学反応式」に関する問題との対応であった。また、図 2 に「数学と化学の問題のどちらが難しく感じましたか？」という問いの解答結果を示す。この結果を見ると、「化学」「どちらかといえば化学」と答えた大学生が、67.9 %となっており、全体的に化学の問題の方が、正答率が低くなっていることとも合致する結果が得られた。対応する二つの問題における数的な論理処理が基本的に同じであると仮定すると、化学における計算問題の難しさには、化学的概念の理解ばかりではなく、化学的概念と数的処理の結び付けに関わる理解が関係していると考えられる。

また、化学(3)(4)のみが数学の問題の正答率が高くなっているのは、対応する数学 B の問題の正答率が 67.6 %と著しく低いためである。正答率が低くなった理由としては、15000 という大きな数の扱いに慣れていない可能性と時間の単位変換をうまく行えない可能性の二つが考えられる。これは、化学の問題にも共通することで、化学でよく用いられる 10ⁿ というような大きな数字の扱いがうまくできない可能性を示唆しているともいえる。

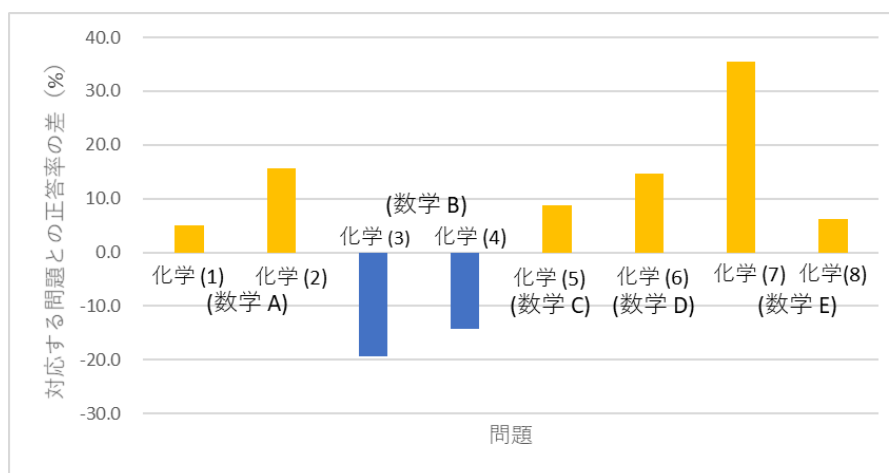


図 1 : 対応する問題との正答率の差
(数学の問題の正答率－化学の問題の正答率)

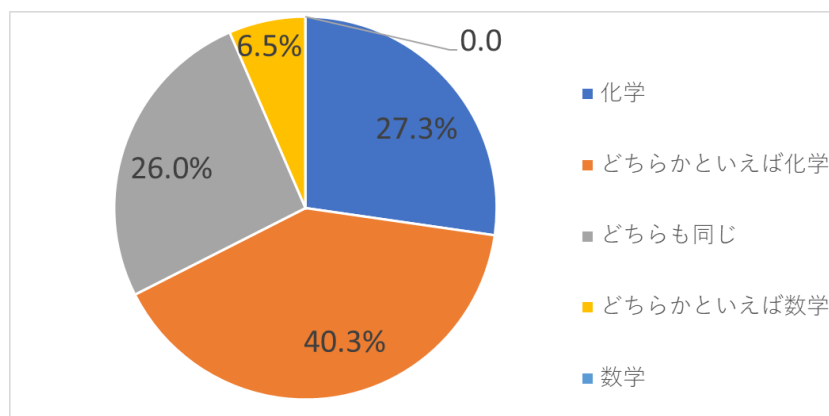


図2：「化学と数学の問題のどちらが難しく感じましたか？」に対する大学生の解答

IV 成果・今後の展望

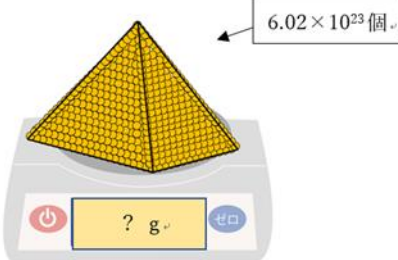
今回の調査をして、設問①では物質量の理解の実態として気体の体積に関する誤概念、定義の活用ができず機械的な計算になってしまう点明らかになった。生徒が定義を基に、思考力を働かせる能力の育成が必要であると考え。その方法として、生徒の頭の中に視覚的なイメージを構成することが必要であると考え。視覚的なイメージ理解を促進するために、パワーポイント等を使用し、物質量やモル濃度、粒子数などの視覚的な理解を促進できるような教材を開発・実践していく方向性である。

設問②では生徒が化学における計算問題を行う際に、そこに含まれる基本的な演算能力ではなく、化学的概念と数的処理との結び付けに関わる理解の点からミスをしている可能性が示唆された。化学学習においては、数的なイメージをリンクさせることを含めて数学と化学の教科横断的な授業が効果的であろう。

V 参考文献

- 今井泉・濱中正夫・下條隆嗣（2005）．高等学校化学における物質量（モル）指導の実際．科学教育研究， 29， 2， 173-182.
- 森川鐵朗・広瀬庄一（2004）．化学量論に基づく物質量の指導法とその学習過程における高校生の理解と分析．科学教育研究， 28， 3， 188-196
- Fraser, J. S. (2012). Is mathematics to blame? An investigation into high school students' difficulty in performing calculations in chemistry. *Chemical Education Research and Practice*, 13, 330-336.

巻末資料1 設問①の質問項目

問題文
<p>① 身の回りで、ある数をワンセットとして考えているものの例を3つ挙げてください。 (例：1 ダース(12個)，1 クラス(40人))</p> <p>【自由記述による回答】</p>
<p>② CO₂とN₂，それぞれ1molの「質量」を求めよ。C=12，O=16，N=14とする。</p> <p>【選択肢】(1)12 g (2)14 g (3)28 g (4)44 g (5)求められない</p>
<p>③ CO₂とN₂，それぞれ1molの「体積」を求めよ。C=12，O=16，N=14とする。</p> <p>【選択肢】(1)22.4 L (2)44.8 L (3)67.2 L (4)求められない</p>
<p>④ 純水18 gには、水分子が何分子含まれているか。H=1，O=16とする。</p> <p>【選択肢】(1)3.02×10^{23}個 (2)6.02×10^{23}個 (3)12.04×10^{23}個 (4)求められない</p>
<p>⑤ CO₂ 88 g， N₂ 2.8 gはそれぞれ標準状態での体積は何Lか。C=12，O=16，N=14とする。</p> <p>【選択肢】(1)2.24 L (2)4.48 L (3)22.4 L (4)44.8 L (5)求められない</p>
<p>⑥ 純水500 mLに水酸化ナトリウムNaClを0.3 mol溶かした場合、この溶液のモル濃度はいくらか。</p> <p>【選択肢】(1)0.15 mol/L (2)0.30 mol/L (3)0.60 mol/L (4)12 mol/L</p>
<p>⑦ 水分子を1 mol集めた。この中に水素原子、酸素原子はそれぞれ何mol含まれているか。</p> <p>【選択肢】(1)1 mol (2)2 mol (3)3 mol (4)含まれていない</p>
<p>⑧ 下の図(=図1)のように、炭素原子を6.02×10^{23}個集めたものを、電子天秤で測りました。値はいくらを示すか。C=12とする。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>【選択肢】(1)12 g (2)24 g (3)36 g (4)求められない</p>
<p>⑨ Aさんは中和反応の実験をするために、0.5 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液が100 mL必要です。0.5 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を100 mL作るためには、何グラムの水酸化ナトリウムが必要か？ H=1，O=16，Na=23とする。</p> <p>【選択肢】(1)2 g (2)4 g (3)20 g (4)40 g</p>
<p>⑩ ある原子(モル質量 X)の原子1個を表す式はどのようになりますか。アボガドロ定数をNとする。</p> <p>【選択肢】(1)X/N (2)N/X (3)$1/XN$ (4)$XN/1$</p>
<p>⑪ 物質質量，原子量，モル質量，モル濃度について定義を自分なりの言葉で説明してください。</p> <p>【自由記述による回答】</p>

巻末資料 2 : 設問②の質問項目

化学①	36 g の炭素には何 mol の炭素原子が含まれているか. C=12
化学②	3 L の純水に 6 mol の塩化水素 (HCl) が溶解している場合, この溶液のモル濃度 [mol/L] はいくらか. H=1, Cl=35.5
化学③	12 kg の炭素には何 mol の炭素原子が含まれているか. C=12
化学④	100 mL の純水に 0.2 mol の塩化水素 (HCl) が溶解している場合, この溶液のモル濃度 [mol/L] はいくらか. H=1, Cl=35.5
化学⑤	NaCl の総質量における Na の質量割合は何パーセントか. Na=23, Cl=35.5
化学⑥	Al ₂ O ₃ の総質量における Al の質量割合は何パーセントか. Al=27, O=16
化学⑦	メタン (CH ₄) は酸素中で燃焼し, 二酸化炭素と水を生成します. 12 g のメタンを完全燃焼させるためには酸素は最低何 g 必要か. C=12, H=1, O=16
化学⑧	2 mol/L の塩酸 (HCl) 1 L を水酸化マグネシウム (Mg(OH) ₂) 1 L で過不足なく中和させるためには, 水酸化マグネシウムの溶液の濃度は何 mol/L か. H=1, Cl=35.5, O=16, Mg=24
数学 A	100 km を 2 時間で移動する車の時速は何 km/h か?
数学 B	60 秒で 15000 m 移動する飛行機の時速は何 km/h か?
数学 C	250 g のケーキのうち 50 g が砂糖である. ケーキ全体の質量をしめる砂糖の質量割合は何パーセントか.
数学 D	食品のタンパク質 0.2 g, 総脂肪(飽和 0.01 g, 不飽和 0.02 g), 炭水化物 0.02 g である. 食品の質量全体をしめる総脂肪の質量割合は何パーセントか?
数学 E	二つの長方形 A, B がある. A は長辺が 4 m, 短辺が 1 m です. B は面積が A の 2 倍で 2 m の辺をもつ. B のもう片方の辺の長さは何 m ですか?

巻末資料3：設問①の回答結果

	選択肢	12 g	14 g	28 g	44 g	求められない	合計
②	CO ₂	1 (1.1%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	85* (96.6%)	2 (2.3%)	88人
	N ₂	1 (1.1%)	1 (1.1%)	83* (94.3%)	1 (1.1%)	2 (2.3%)	
③	選択肢	22.4 L	44.8 L	67.2 L	求められない		合計
	CO ₂	78* (88.6%)	0 (0.0%)	2 (2.3%)	8 (9.1%)		88人
N ₂	77* (87.5%)	3 (3.4%)	0 (0.0%)	8 (9.1%)			
④	選択肢	3.02 × 10 ²³	6.02 × 10 ²³	12.04 × 10 ²³	求められない		合計
		0 (0.0%)	84* (95.5%)	1 (1.1%)	3 (3.4%)		88人
⑤	選択肢	2.24 L	4.48 L	22.4 L	44.8 L	求められない	合計
	CO ₂	13 (14.8%)	5 (5.7%)	6 (6.8%)	60* (68.2%)	4 (4.5%)	88人
N ₂	58* (65.9%)	7 (8.0%)	4 (4.5%)	15 (17.0%)	4 (4.5%)		
⑥	選択肢	0.15 mol/L	0.3 mol/L	0.6 mol/L	12 mol/L		合計
		10 (11.4%)	2 (2.3%)	76* (86.4%)	0 (0.0%)		88人
⑦	選択肢	1mol	2mol	3mol	含まれていない		合計
	水素原子	8 (9.1%)	80* (90.9%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)		88人
酸素原子	81* (92.0%)	7 (8.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)			
⑧	選択肢	12 g	24 g	36 g	求められない		合計
		85* (96.6%)	2 (2.3%)	1 (1.1%)	0 (0.0%)		88人
⑨	選択肢	2 g	4 g	20 g	40 g		合計
		70* (80.5%)	10 (11.5%)	6 (6.9%)	1 (1.1%)		87人
⑩	選択肢	X/N	N/X	1/XN	XN/1		合計
		67* (77.0%)	11 (12.6%)	4 (4.6%)	5 (5.7%)		87人

(正答には*をつけている)