

13. 中等化学教育における問題解決能力の育成

片平克弘

はじめに

化学の教師は、授業を通じて、より多くの生徒が問題を上手に解けるように指導している。しかしながら、多くの生徒は化学の問題は難しいと感じている。特に、中学校や高等学校における初期の段階で問題解決につまずくことは、化学の学習を阻害する大きな要因であり、その後の学習への取組みを失わせる原因にもなっている。

ここでは、問題解決の能力の育成を、化学教育の中でも中心的な目的として位置づけ、以下、化学の問題解決の過程を構成する要素、問題解決における生徒の知識や理解の役割、さらには、問題解決を含んだ教授ストラテジーなどについて検討する。

1. 問題解決と化学の問題

われわれは、問題解決という用語を日常的に使用している。問題解決とは、問題を解決しようとする人が、その解を自分で見つけることができなければならないとされているが、一般的には、目標やある到達点がわかっている、そこへ到達できない場合に問題が設定され、その目標や答えに達するための手段や方法を見出すことが問題解決と言われている(馬場、1987)。問題解決の過程はどの分野においても複雑な過程であり、言語的な知識、実証的な知識、スキーマ的な知識などが使用されている。さらに、これら一連の知識に加えて、与えられた問題の解決を保証するアルゴリズムに関する知識やストラテジーに関する知識も必要とされる(大淵、1989)。このような知識は化学の問題解決にも基本的に必要な知識である。

次に、化学における問題について見てみよう。たとえば、次のような問が示された場合、われわれは、どれを化学の問題と定義できるだろうか。

- (1) ある容器に酸素(O_2) 32 gがある。この中に酸素分子は標準状態でいくら含まれているか？
- (2) 密度の公式は、質量/体積である。質量が30gで、体積が12mlの時、密度はいくらか？
- (3) 粉末ジュースは、18 gの粉末を120ccの水に溶かして作る。もし、36 gの粉末を240ccの水に溶かし、その後、120ccになるまで水を蒸発させたら濃度はどうなるか？
- (4) A、B 2つの物質がある。質量はA、B共に等しいが、密度はAのほうが大きい。このとき、どちらの体積が大きいか？

上記の問のうち、どれを化学における問題と規定するかは難しい。たとえば、1番目の問は、多くの化学の教師が問題と呼んでいるものの典型的なものかもしれない。2番目の問は、解決に導く情報が問の中で与えられており、これは問題とは見なされず単に練習と捉えることもできる。また、この問はアルゴリズムを使用して簡単に解くことができる。しかし反面、アルゴリズムを問題とする場合には、アルゴリズムそのものの使用の困難が伴っていることに注意し

なければならない。3番目の問は粉末ジュースを用いた濃度計算である。この問は対象となる物質が化学の授業の中で使用される薬品ではないが、重量モル濃度の問題に関する典型的なアナロジーである。4番目の問は数値を全く含んでいない。この4番目の問を解ける生徒を、2番目の問のみを解ける生徒と比べると、4番目の問を解ける生徒の方が化学をより良く知っていると言うことができる。

以上4種類の例を見てきたが、これらに類似した問は、それぞれの学校段階の化学の授業の中で扱われている。また、いま見てきたように、問題の定義に際しては様々な見解があり、一概に、ある問のみを取り上げて化学の問題と決めることは難しい。そこで、本稿ではこれら4例に代表される問すべてを化学における問題として扱っている。

2. 問題を記述する用語や変数

問題解決に成功する第一の関門は、「問題が示されている文章の意味を理解できるかどうか」である。とりわけ、問題文を記述している用語やその文脈の理解が重要である。特に、化学の問題文の中には、日常用語と化学用語の2種類が混在している。

この日常用語と化学用語の問題では、一般的には、問題の中で用いる化学用語をやさしい表現にすれば、多くの生徒は正しく答えることができると考えてよいだろう。たとえば、「ある気体の密度を求めなさい？」という問よりも「ある気体の質量を体積で割った値を求めなさい？」という問のほうが答えやすくなる。また、否定の文章を肯定的な文章に変えたり、長く複雑な文章を幾つかの単純な文章にしたり、また、受動体を能動体に変えた時にも生徒の答え方には変化が現れる。つまり、同じ内容であっても、化学的な用語を具体的なものに変えるだけで初学者の理解の様子は異なってくる。

次に、言語的な記号の役割について試してみる。GabelとSherwood(1984)は、モルの問題をモデルに、砂糖やオレンジなどの日常的なものを用いたアナロジーを使用し、問題文に含まれる変数の重要性を確定しようとした。その結果次のような知見が得られている。

- (1) 「オレンジのように粒子が砂糖よりも大きいものを用いた時に問題が解きやすくなるかどうか」については何ら違いがなかった。
- (2) 「billionという用語の代わりにbagという用語を用いたら、問題が解きやすくなるかどうか」については何ら違いがなかった。
- (3) oneとかaとかanの代わりに1という数字を用いたら、生徒は問題をらくに解いている。すなわち、数値の使用は問題解決を容易にする。
- (4) かけ算の使用を含む問題は、わり算の使用を含む問題に比べて解きやすい傾向がみられた。

以上、問題文を提示するという事柄の影響について試してみた。このように、問題を記述している用語や変数などの言語的な記号は初学者の語彙の把握やその使用に影響を及ぼしており、結果的には化学の問題解決を左右する大きな要因となっている。

3. 問題解決と化学概念の発達

次に、問題解決における初学者の化学概念について検討する。初学者の基礎的な知識は決し

て十分なものではないため、初学者と熟達者の問題解決スキルを比較分析すると、一般的には、熟達者は概念をより巧みに理解しており、問題をよりの確に表現することができると考えられている。初学者は公式の他には一般的な知識のみによって問題を解いているのに対して、熟達者は公式以外にそれを選択・適用するためのその領域固有の大量な知識を用いて、より効率的に問題を解いている（鈴木、1989）。さらに、熟達者は概念の上位のコマンドを有しているのみならず、また概念が概念フレームワークの中で結びつけられており、これをもとに長期記憶の中からたやすく必要な知識を引き出している。このことは、問題解決にとって、単に知識の有無だけが問題なのではなく、それらがどのように構造化されているかが問題であることを示している（Gabel, 1984）。言い換えれば、問題解決には、問題になっている内容領域の知識を十分に持っていること、その知識を構造化していること、与えられた問題で何が重要かをすぐに把握することなど、が要求される（無藤、1990）。したがって、生徒が化学の問題解決の熟達者になるためには、問題で扱われる化学の基礎的な概念の習得やシステムの中でそれらを互いに結びつけておくことが課題となる。

以下、化学の基礎的な概念である(1)質量と体積の概念、(2)物質の状態の概念、(3)モル概念、(4)粒子概念について初学者の概念理解の実態を概説する。

(1) 質量と体積の概念

質量と体積の概念に関する生徒の認識の実態としては次のような報告がある。たとえば、

1) 高校生の時に化学を履修した大学生でさえ、 $\text{体積} = \text{長さ} \times \text{幅} \times \text{高さ}$ の公式を総ての幾何学的な形をしたものに应用している。そのため、箱状の固体以外には体積を求めることができない。

2) 容器の体積を求めるようにいわれた時、ガラスで囲まれたその容量を求めずに、容器として使用しているガラスそのものの体積を求める生徒がいる。

3) 砂の中に水が吸収される様子を見た経験があるために、200mlの水に50mlの砂を注いだ時の体積を予測させると、その体積は200ml以下だと答える生徒が多数みとめられる。

これらはいずれも、異なった状況下での質量や体積の概念が十分に発達していない事例である。このような化学量論に関わる基礎概念の獲得の失敗は問題解決を阻害する要因となっている。

(2) 物質の状態の概念

Osborn と Cosgrove (1983)は、ニュージーランドの生徒に対して、水が状態を変化させたときに何が起きているのかを調査している。その結果、1)17才の生徒の40パーセントが沸騰している水の中の大きな泡は、水蒸気ではなく酸素と水素からできていると考えていること、2)30パーセントは濡れている皿が乾く時、水は酸素と水素として失われると考えていること、3)冷たい水がはいったジャーの外側の水滴はどこからきたのか尋ねると、およそ35パーセントの生徒は水素と酸素からと答えること、を報告している。物質の状態やその状態変化に関する概念は化学の教師が考えているほど生徒には正しく認識されていない概念である。

(3) モル概念

モル概念は世界中の多くの国の生徒が困難を感じている概念である。たとえば、Duncan や Johnstone (1973) は、彼らの研究の中で、スコットランドの15才の生徒では、40パーセントの

生徒しかピアジェの形式的操作段階に達しておらず、モルに関する学習が15才の生徒に適切かどうか疑問を呈している。彼らは、この段階のほとんどの生徒たちはグラムで表示された化合物の質量計算はらくに行うが、平衡状態の化学反応の係数の意味は正しく理解していないと指摘している。多くの生徒は、反応における薬品間の関係を1：1として解釈していた。

Novick と Menis (1976) はモル概念に関するイスラエルの15才の生徒の理解について調査し、平均的な知能(IQ の測定値が100-122)以上の生徒でさえ、モル概念の十分な理解には程遠いことを報告している。インタビューテストにおける彼らの正答率はわずか64パーセントである。IQが86-100の生徒の正答率は35パーセントと低い。さらに、Novick と Menis は、多くの生徒はモルを計算をするための数として見ておらず、さらに、気体に対する22.4 l を1molの体積と限定していない点を強調している。生徒がモルの問題に対してこのような困難を感じる中心的な理由としては、モルを用いた解法がアボガドロ数 (6.02×10^{23}) という大きな数の導入や、それを質量や体積と関連づけて扱う作業を含んでいることがあげられる(片平,1987)。

同様のことは、Griffiths や Kass や Cornish (1983) も指摘している。彼らはモル概念に対する学習階層を確認し、モル概念の学習における重要なスキルは、粒子の相対的な粒子数を物質の質量を関係づける能力にあると述べている。とりわけ、生徒が粒子的な関係を学習する以前に、異なった物質の質量にモルを関係づけて学習することが必要である点も指摘している。

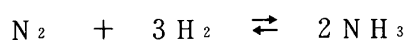
(4) 粒子概念

初学者が粒子概念を理解していない場合には化学の問題解決は難しいものになる(片平,1988)。

たとえば、Novick と Nussbaum (1978)の研究によれば、14-15才のイスラエルの生徒の60パーセントが、気体を含む現象を説明するために粒子モデルを使用しており、46パーセントが粒子の間からの空間(真空)があると確信している。また、Novick と Nussbaum (1981)が行った様々な年令の生徒に対する研究では、物質の粒子モデルに関する5つの概念について報告している。それぞれの概念を理解している高等学校の生徒のパーセンテージをカッコ内に示した。

- ・気体の粒子は均一に配置されている (70%)
- ・気体の粒子は一定の運動をしている (30%)
- ・加熱や冷却は粒子の運動に変化を生じる (50%)
- ・溶解は粒子密度の変化を含んでいる (50%)
- ・気体の粒子の間にはからの空間がある (50%)

また、化学方程式の粒子的理解に関しても多くの報告がある。たとえば、次のような研究がある。これは、14才の高校生に対して、単純な化学反応式の両辺をいかにして等しくするかを調査したものである。総ての生徒は与えられた反応式の両辺を揃えることができたが、しかし、彼らのうち半分は完成させた反応式の表記に矛盾しない図を書くことができなかった。これらの図は、保存された原子の総数と一致していたが、しかし、個々の種を正確に示してはいなかった。たとえば、



の反応の表記を以下のような図で示すのである。



これまでの例から、化学の問題解決に必要な基礎的な概念を、生徒は彼ら独自の考え方（以下、オルタネーティブコンセプション）をもとに理解していることが確認できた。これらのオルタネーティブコンセプションは学習を妨げるにもかかわらず、それらは、われわれが小さい頃からずっと行ってきた世界を理解するための手掛かりであり、化学概念に容易に変容させることは難しい（片平,1991）。さらに、これらの日常生活を通して形成されたオルタネーティブコンセプションは世代間を越えて、あるいは国家間を越えて共通のパターンが見出せる。

4. 問題解決能力と適性

問題解決能力と様々な適性についてもいくつか研究が行われている。

- (1) Gabel と Sherwood と Enochs (1984)は、生徒が比例をもとにしたアナロジー（以下、比例アナロジー）でいかに問題を解くかを観察している。彼らは200人以上の生徒に声を出して化学の問題を解くように指示している。その結果、この比例アナロジーを用いることの優れた生徒はこれを用いる能力の低い生徒よりアナロジーを用いたストラテジーを効果的に使用していると報告している。
- (2) 具体的操作段階と形式的操作段階の高等学校の化学の生徒に対する問題解決の研究では、両者のグループ間では差が認められなかったという報告がある。形式的操作段階の生徒は、問題を読むこと、問題を組織化すること、評価することにおいて多少は優れてはいるものの、両グループの生徒とも、アナロジーの使用、間違いの数、化学量論の問題を解決するために選択したストラテジーにおいても同じような応答を示している。しかし、Ward と Herron (1980)は、形式操作段階の大学の化学の学生は形式的な化学の課題のみならず、具体的なものに対してもよく対応していると報告している。しかし、単に事実や公式の記憶を要求するような内容の操作については、この2つのグループとも同じような結果を示したと指摘している。
- (3) 問題解決能力を状況依存と状況独立に関連づけた研究もある。そこでは、状況を独立してとらえる学生は化学の問題解決がよくできること、彼らは適切な情報や不適切な情報、あるいは、暗黙の情報を含んだ比例アナロジーの問題を上手に解くことができることが報告されている。この状況独立の能力は、個人が問題を自分に意味あるものにするために如何に上手に再構造化するかどうかを測定することによって判定できる。
- (4) 問題解決能力に関係する他の適性としては、対象や状況を視覚化するスキルもあげられる。高度な視覚化の能力を持った化学の学生は問題解決や量的な課題に対して、視覚化の能力の低い学生をしのぐことができる。

5. 化学の問題解決の授業改善に向けて

これまでは化学の問題解決の困難点を見てきた。次に、生徒がよりよく問題解決を行うための授業改善の視点を検討する。

- (1) 一般的に化学の教師や化学の入門用テキストは、問題解決にラベル学習を用いている。ラベル学習は、物や物の種類などに対して、一貫した言語による応答を行う能力の獲得を意味している（Gagne, Briggs, 持留他訳,1986）。しかし、この方法による情報は、単に短い言語

連鎖であり、ラベルという意味で物の名称を学習することはその名前の意味を学ぶこととは全く違うのである。したがって、ラベル学習だけでは概念の獲得を十分に行うことはできない。

- (2) ラベル学習が不得意な生徒、たとえば、数学が不得意な生徒でも、もし図化された一覧表やアナロジーを与えられれば、モル、モル濃度、化学量論を含んだ問題を上手に行うという報告がある。たとえば、GabelとSherwood(1983)は図1に示すようなダイアグラムを作成している。

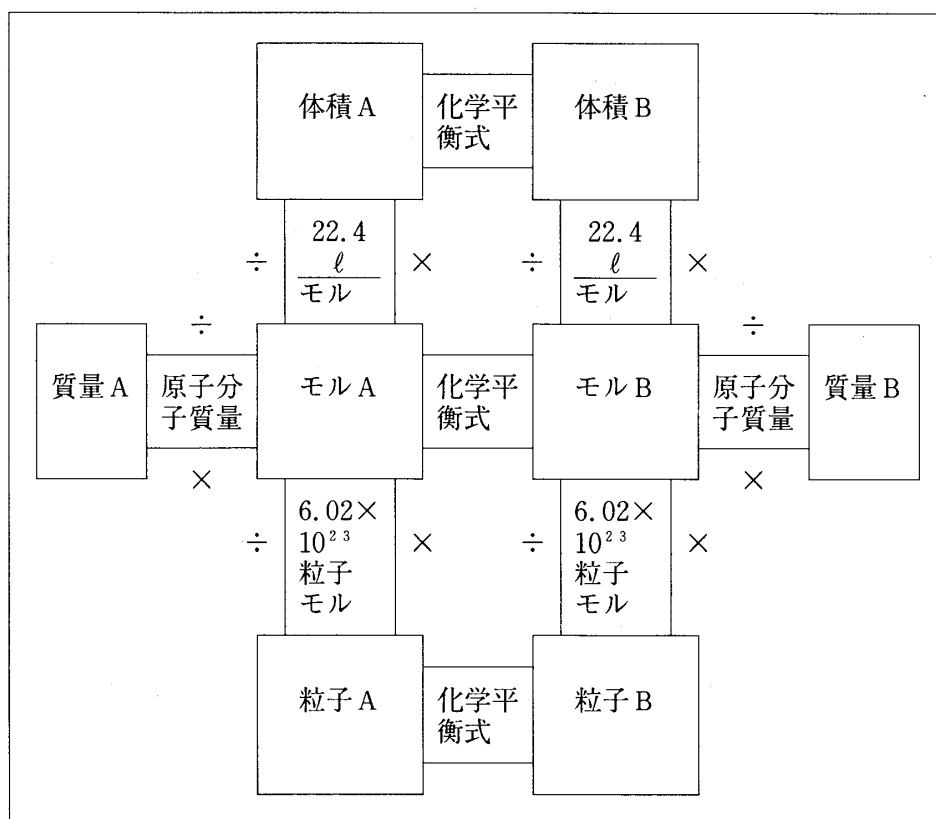


図1：化学量論の問題を解くための関係図

- (3) 化学の問題解決の中で用いられる代表的なアナロジーとしては、モルをダースと比較する例がある。しかし、アナロジーも状況によっては万能ではない。たとえば、次のような、粉末ジュースの濃度の問題ではモル濃度との対応づけがうまくできない生徒が多い。

モル濃度の問題: 1 mol の水酸化ナトリウム(NaOH)の溶液 3 l を作るためには、水酸化ナトリウムは何g 必要ですか？

粉末ジュースを用いたアナロジー: 標準的な濃さの2倍のジュースを作るためには、ジュースの粉末は何g 必要ですか？

単なる希釈問題でさえ、多少問題が複雑になると解けない生徒が出てくる。このような場合には、教師がアナロジーを用いる方法をアドバイスし、生徒がそれを試してみる時間が必要になる。化学教育の目的は、生徒に正しい概念を習得させることであり、単に機械的な正答を求めさせようとするものではない。一般的には、多くの生徒は簡単なモル濃度の問題は

アナロジーを使用することによって切り抜けている。授業実践の中でアナロジーを使用するための時間の確保が大切な課題である。

- (4) 一般的なヒューリスティックも化学の問題解決の改善に寄与している。一定の指針を持った解決方法をヒューリスティックと規定すると（大淵、1989）、われわれはいろいろなヒューリスティックを用いて問題を解いている。しかし反面、このヒューリスティックもアナロジー同様万能ではない。たとえば、教える内容が広範囲に及び、かつ詳しい言語的な伝達を必要とする場合には、ヒューリスティックは強調されない（無藤、1990）。ヒューリスティックは、少ない内容を教える時、すなわち法則の把握や転移などには有効である。

一定の指針を持ったヒューリスティックとしては、1945年に G. Poyla が数学の問題解決について発表したステップが代表的なものとされている。そこでは、①問題を理解する②プランを工夫する③プランを実行する④プロセス全体を振り返る、の4つのステップが示されている。同様のステップは化学の問題解決にも当然当てはまる。図2には Mettes ら(1980) が示した化学のヒューリスティックを示した。ここで示されている構造は、いかにして化学の問題を解いたらよいかを考える上で有効である。

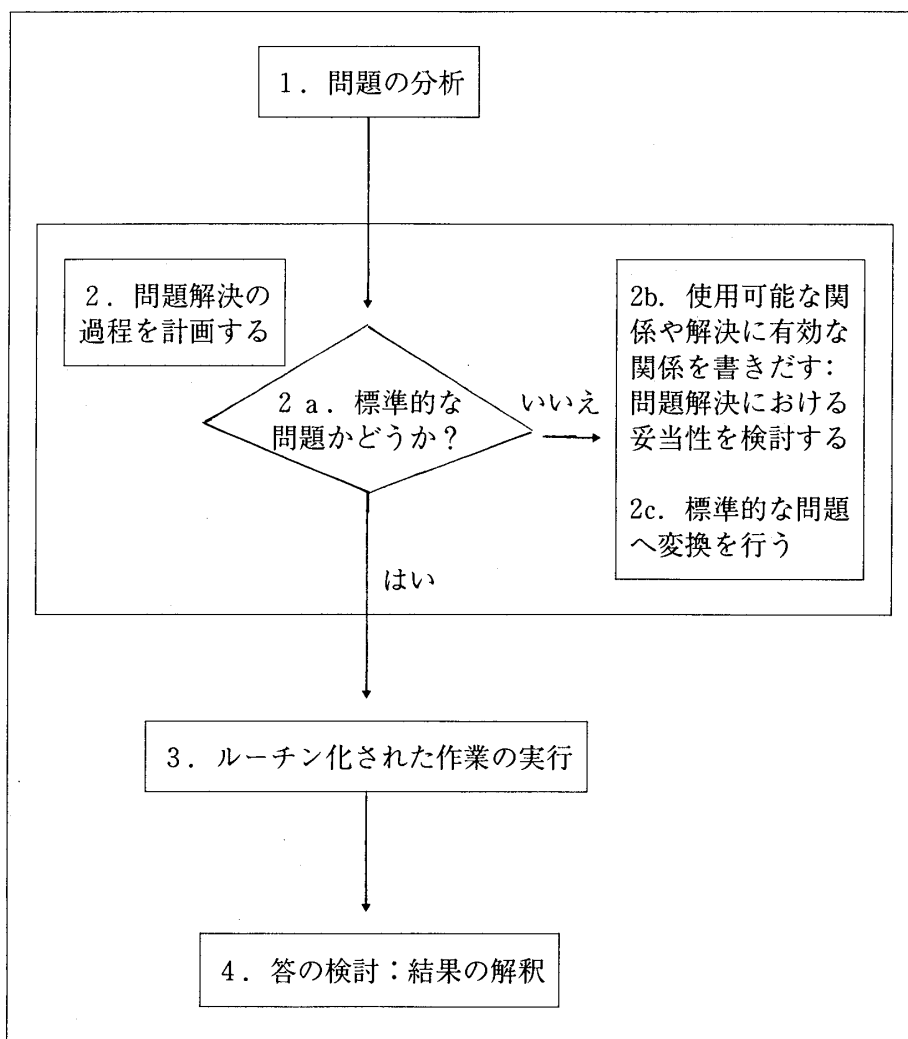


図2：ヒューリスティックの基本的な展開

また、ヒューリスティックの中に情報処理モデルを具体化する場合には、①言葉での問題記述、②応用可能な略図の作製、③ルールや定義等の復唱、④解決のためのマトリックスの作成、⑤数学的解決、⑥レビュー、のような要素が考えられる。これらを実際に活用するためには、それを一貫して使用することやそれぞれのステップにかかる特別な時間を確保することなどが検討課題である。また、対象によっては、ステップ数の少ないより単純なヒューリスティックが有効な場合もある。

6. 情報処理モデルを用いた化学の問題解決

これまで行われてきた多くの研究の中でも、情報処理モデル(Reif, 1983)は、化学の問題解決にもさまざまな情報を提供している。一般的に、情報処理モデルは、問題を解く過程を情報の入出力や生成、消去、変換といった基礎的な処理の過程とみなしている。このモデルの中には、これまで指摘してきた幾つかの特徴が組み込まれている。問題解決の熟達者は、基本的概念を習得しており、自分の概念フレームワークの中にそれらをリンクさせている。そして必要に応じて、これらを長期記憶の中から引き出していた。この熟達者の特徴が情報処理モデルには一部応用されている。

われわれは問題に取りかかる場合、まず第一に問題を理解するための単純な再記述化を試みる。次に、記憶の中に組み込まれている概念との関係を意識しながら理論的な再記述化を行う。この作業は個人の概念フレームワークの中で問題を構造化する作業であり、具体的な解決のためのステップが作られる。また、実行の最終段階では、解決結果の妥当性が評価される。図3に、この方法から導かれる、化学の問題解決の例を示した。

〔問題 標準状態(0°C, 1気圧)において、NH₃ 34g が占める体積を求めよ。〕

単純な再記述：

既知事項； NH₃ の質量 = 34g
 温度 = 0°C
 圧力 = 1気圧
 求めるもの； NH₃ の体積 (単位、ℓ)

理論的な再記述：

粒子数 = 6.02×10^{23} 個/mol
 温度 = 0 °C
 圧力 = 760 mmHg
 1 mol あたりの体積 = 22.4 ℓ / mol (0°C, 760mmHg)
 1 mol あたりの質量 = 14g + 3 × 1g
 (N, 1mol) (H, 1mol)
 = 17g
 (NH₃, 1mol)

$$\frac{34g}{17g/mol} = 2 \text{ mol} \cdots \text{NH}_3 \text{ の物質質量}$$

もし、温度と圧力が一定なら
2molは 1mol の質量の 2 倍
体積の 2 倍
粒子数の2 倍

問題解決:

$$\frac{34\text{g}}{17\text{g/mol}} = 2 \text{ mol} \cdots \text{NH}_3 \text{ の物質質量}$$

$$2 \text{ mol} \times 22.4 \text{ l/mol} = 44.8 \text{ l}$$

(物質質量) × (1mol あたりの体積) = (求める体積)

妥当性のチェック:

質量は標準状態の1molの質量より多い。この場合は2倍である。質量が2倍ならば、粒子の数は2倍でなければならない。さらに、それらは2倍の空間を占めなければならない。

44.8 l は標準状態の体積22.4 l の2倍の体積である。

図3：情報処理モデルを用いた化学の問題解決

このような情報処理モデルは化学の教授の中で、問題を説明する3種類のレベル、すなわち、マクロ（巨視的、物理的）なレベル、記号（変数や公式の記号）のレベル、ミクロ（微視的、粒子的）なレベルにおける説明に効果的である。この3種類の手続きを踏むことにより、生徒は問題を的確に再記述、再構造化することができるようになるだろう。したがって、このような方法を繰り返すことにより、生徒の化学の問題解決はより知的になり、生徒はより複雑な問題を解けるようになるのである。

おわりに

化学教育の研究に携わっている者は総ての生徒に効く万能薬を提供することはできないが、しかし、化学の問題解決の達成をより改善するために何が必要かを探し続けることはできる。それには、やはり、化学の「問題を解く過程がどんな過程であり、記憶や推論のような認知過程とどのようにかかわりあっているのか、問題を解く過程における理解とか学習といった言葉はいったい何を指しているか」（波多野、1982）が、一層深く問われなければならない。具体的には、問題を解決する者の概念発達のレベルと概念の統合力のレベル、問題を解決する者によって感じられる困難度、問題を解決する者のオルタネーティブフレームワークなどが研究課題になろう。

【引用文献・参考文献】

馬場道夫編著(1987)、学校教育のための認知学習理論、共同出版、p. 140.

Duncan, I. M., and Johnstone, A. H. (1973), The mole concept, *Educational Chemistry*, 10, 212-214.

- Gabel, D. L., and Sherwood, R. D. (1983), Facilitating problem solving in high school chemistry students, *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 163-177.
- Gabel, D. L., and Sherwood, R. D. (1984), Analyzing difficulties with mole-concept tasks by familiar analog tasks, *Journal of Research in Science Teaching*, 21, 843-851.
- Gabel, D. L., Sherwood, R. D., and Enochs, L. G. (1984), Problem-solving skills of high school chemistry students, *Journal of Research in Science Teaching*, 21, 221-233.
- Gagne, R. M., Briggs, L. J. 持留英世、持留初野訳(1986)、カリキュラムと授業の構成、北大路書房、p. 101.
- Griffiths, A. K., Kass, H., and Cornish, A. G. (1983), Validation of a learning hierarchy for the mole concept, *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 639-654.
- 波多野誼余夫編(1982)、認知心理学講座4 学習と発達、東京大学出版会、p. 61.
- 片平克弘(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 - モル概念指導のための基礎的資料として -、日本理科教育学会研究紀要、28、1、27-34.
- 片平克弘(1988)、児童・生徒の粒子概念の形成に関する研究、筑波大学大学院博士課程教育学研究科教育学研究集録、12、133-141.
- 片平克弘(1991)、理科教育における構成主義的認知研究と授業改善 -物質の粒子性を事例に-、日本科学教育学会第15回年会論文集、87-90.
- Mettes, C. T. C. W., Pilot, A., Roosink, H. J., and Kramers-Pals, H. (1980), Teaching and learning problem solving in science, *Journal of Chemical Education*, 57, 882-885.
- 無藤隆、久保ゆかり(1990)、学習と教育、新曜社、p. 44.
- Novick, S., and Menis, J. (1976), A study of student perceptions of the mole concept, *Journal of Chemical Education*, 61, 720-722.
- Novick, S., and Nussbaum, J. (1978), Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter : An interview study, *Science Education*, 62, 273-281.
- Novick, S., and Nussbaum, J. (1981), Pupils' understanding of the particulate nature of matter : A cross-age study, *Science Education*, 65, 187-196.
- 大淵憲一、石田雅人(1989)、学習指導の心理学、ぎょうせい、p. 58.
- Osborn, R. J., and Cosgrove, M. M. (1983), Children's conceptions of the changes of state of water, *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 825-838.
- Reif, F. (1983), How can chemists teach problem solving ? *Journal of Chemical Education*, 60, 948-953.
- 鈴木宏昭他(1989)、教科理解の認知心理学、新曜社、p106.
- Ward, C. R., and Herron, J. D. (1980), Helping students understand formal chemical concepts, *Journal of Research in Science Teaching*, 17, 387-400.