

酸塩基反応の量的関係への気づきを支援する 分子模型教材を用いた授業実践

向井 浩・山本 勇仁*・小野 聖太**

Classroom practice using molecular model teaching materials to help students
to find quantitative relations in acid-base reactions

Hiroshi MUKAI, Takehito YAMAMOTO and Shota ONO

Accepted June 16, 2020

抄録：水溶液中の酸塩基平衡を定量的に理解する上で、物質収支、電荷均衡、プロトン収支の量的関係の知識が必要である。しかし、保存則と化学量論に基づくこれらの量的関係を概念的に理解できても、具体的な関係式を導き出すことには困難さを伴うことが多い。そこで分子模型で反応溶液を可視化する演習を行い、関係式を学習者自らが発見することを支援する授業を実践した。プレテストとポストテストで演習の効果を定量的に評価し、有効性が認められた。化学反応の量的関係の学習における分子模型の役割を、記号的表象、映像的表象、活動的表象の3要素から成る表象ネットワークの観点から意味づけた。活動的表象としての分子模型は、表象ネットワークの中で、化学反応式の記号的表象と反応パターン表の映像的表象と共に機能することで、学びを促進させたと推察された。

索引語：分子模型、保存則、物質収支、電荷均衡、表象ネットワーク

Abstract: For a quantitative understanding of acid-base equilibrium in an aqueous solution, knowledge of the quantitative relations between chemical species such as mass balance, charge balance, and proton balance are necessary. However, it is often difficult to derive their specific equations from chemical reaction formulae, even if their concepts, which come from conservation rules and stoichiometry, are understood. Therefore, the chemistry class helped students to observe quantitative relations and practice their specific equations, which included exercises to visualize the reaction solution using molecular models. An evaluation using the pretest and post-tests found positive effects of such exercises. This study discussed the role of the molecular models in the learning of quantitative relationships in chemical reactions from the viewpoint of a representation network which was consist of three elements of symbolic, pictorial and active representation. The molecular models as active representation could accelerate the learning by working with chemical reaction formulae as symbolic representation and the tables of reaction patterns as pictorial one in the network.

Key Words: molecular model, conservation rule, mass balance, charge balance, representation network

* 京都教育大学大学院教育学研究科理科教育専修平成30年度修了

** 千葉県中学校教諭

1. はじめに

化学平衡は、化学現象を定量的に取り扱うための重要な考え方の一つである。これまでに、種々の化学反応に対する平衡定数の値が蓄積されており、これらを化学平衡の法則に適用することで、化学平衡時における系内の成分濃度を、実験せずとも計算から予測することが可能である。例えば、水溶液内の酸塩基平衡に適用すれば、酸性、または、塩基性物質を含む水溶液の液性が、定性的に酸性か、塩基性かを判断するだけでなく、その水溶液の酸性度 (pH) の度合いを、値として知ることができる¹⁾。このように、化学平衡計算を用いた化学反応の定量的理解は大変有益であり、高等学校「化学」の教科書でも取り扱われている²⁾。化学平衡の理論計算を行うに当たっては、系内の物質の量的関係を把握しておくことが、前提として必要である。例えば、水溶液中の酸塩基平衡を定量的に理解する上で必要な量的関係の知識として、物質収支、電荷均衡、プロトン収支の関係がある³⁾。これらの量的関係は、保存則と化学量論に基づいており、これらを概念的に理解することは比較的容易であると考えられる。しかし、これらの量的関係から、それぞれの反応系に対応した具体的な関係式を導き出すことには困難さを伴うことが多い。そこで本研究では、関係式の立式を支援する操作型分子模型の教材開発と、それを用いた教授方略について検討した。

分子模型は、目には見えない極微な分子や結晶の立体構造を、模型を通して視覚化し、化学結合の理解に役立てる利用が多い^{4, 5)}。立体構造以外にも、原子の模型で重さや大きさの違いを体感させる用い方⁶⁾や、原子の模型で結合と解離を模擬的に再現して化学反応式で示された化学反応を視覚化する用い方⁷⁾もある。また、化学結合に関係する静電引力、静電反発力を磁石の磁力で模擬的に実感させる模型が提案されている⁸⁾。一方、化学反応における量的関係を理解させるために、分子模型を利用する試みはこれまで成されてこなかった。複数分子の数の変化を教科書上の絵図で表現するに止まっており、分子模型を操作して化学反応前後の量的関係に着目させる動的な学習教材は見受けられない。本研究では、磁石を利用した結合の組換えが可能な分子模型を製作し、この分子模型の操作によって化学反応の量的関係を自ら発見させることを狙った授業実践を行い、その評価を行った。

本研究で実施した授業実践においては、抽象的概念と具体的事象の往還に基づく、化学反応における量的関係の真の理解を目指した。ここで抽象的概念とは、物質と電荷の保存、プロトン授受、および、化学量論の概念であり、具体的事象とは、これらの概念に立脚した物質濃度の量的関係式の表現である。保存概念から量的関係式への立式の際には、抽象的概念が立式の指針や根拠を演繹的に与えることができる。逆に、分子模型操作から得られた量的関係の規則性から、帰納的に抽象概念である保存の概念に思い至ることも期待できる。このような目標設定のもとで教授方略を検討し、授業実践を行った。

2. 化学反応における量的関係―「塩の加水分解」を例に―

化学反応における量的関係を理解させる単位として、高等学校「化学基礎」の「化学反応式と量的関係」⁹⁾がある。化学反応式は、原子・イオン・電子、これら粒子が一定の比率 (化学量論比) のもとで組み換えられ、反応物から生成物に変化することを示している。さらに、化学反応式の両辺は、物質と電荷の量が反応前後で均衡するように示さなければならない。ここでは、化学反応式の係数の

比（化学量論比）の量的関係のもとで化学変化が進行することや、化学反応式両辺での原子・イオンと電荷の均衡が述べられている。これは、反応前後で物質と電荷が保存されるという保存則を示していることに他ならないが、この包括的な概念である保存概念が明示的に示されているとは言い難い。物質に関する保存概念は化学反応における量的関係を捉える際の根幹となる。質量保存の法則はその一例である。しかし、高等学校「化学基礎」や「化学」においては、保存概念は半ば自明のものとして扱われており、改めてその視点を明示していない。この点が、具体的な反応系に即して量的関係を捉えること（具体的な量的関係式を導き出すこと）を困難にする一要因と考える。

また同単元において、「反応物の過不足」として、反応終了後も未反応物が共存する反応系の場合についても言及されている。これは高等学校「化学」の「化学平衡」の考え方につながる量的関係の記述である。生成物と未反応物も含めた上での系内全体で成り立つ保存則の関係の理解が、化学反応における量的関係を把握する際に不可欠である。

以上の「化学反応式と量的関係」の単元で示される、化学反応式から読み取れる量的関係は、各化学反応の総和として成り立つ反応系全体においても同様に成立する。例えば酸塩基反応が進行する水溶液において、酸塩基反応の化学反応式で捉えた保存則の関係は、多数の粒子が酸塩基反応を同時進行している水溶液全体についても同様に成り立つ。これは、個々の粒子の化学反応の総和で水溶液全体が成り立つためである。そのため、系全体の量的関係を捉える化学平衡においては、化学反応式で捉えた保存則の関係を、水溶液全体に拡張して捉えることができない。すなわち、この個々の粒子から溶液全体への保存概念の拡張が必要である。しかし、高等学校の化学においては、この点に十分に目を向けられていない印象が強い。

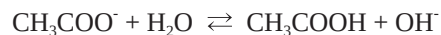
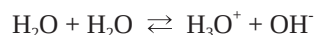
授業実践における題材として、酸塩基反応の一つである「塩の加水分解」²⁾を取り上げた。「塩の加水分解」は高等学校「化学」の「化学平衡」の中で扱われる単元である。酸性・塩基性物質とそれを溶かす溶媒である水との化学反応に着目している。この反応は、塩の水溶液の酸性度を決定する要因となるので重要視される。例として、弱酸とその塩である酢酸ナトリウム（1価陽イオンの塩）の水溶液が取り上げられることが多い。ここでは下記の反応が進行する。

1 価イオン (Na⁺) の系



上に示されるように、水と水、或いは、酸（塩基）と水との二つの酸塩基反応が同時進行するやや複雑な反応系である。このため、水と水との反応を無視して単純化して考えることが一般的である。しかし、系全体での化学反応の量的関係の原則である保存則を踏まえると、片方を無視することは、保存則の関係が崩れるために問題がある。まずは、保存則の関係を満たした上で、無視できるほど小さな量（この場合は水の電離）を近似的に 0 と置くように、手順を追って考えるのが筋であると考え。このように、高等学校の化学では、保存概念が明示的に示されていない点が問題であると感じる。

上記の酢酸ナトリウム水溶液の例では、化学反応式の係数がいずれも 1 なので比較的単純であるため、電荷に関する保存則が見逃されがちである。そのため、次の 2 価イオンの反応系は、電荷に関する保存則に着目させる上で、良い一例となると考える。

2 価イオン (Ca^{2+}) の系

2 価イオンの系を先の 1 価イオンの系と比べると、(2) 式が (4) 式に入れ替わっている点に違いがある。2 価イオンの系の場合、カルシウムイオン (Ca^{2+}) と酢酸イオン (CH_3COO^-) とが 1 : 2 の物質質量比になっていること、カルシウムイオン (Ca^{2+}) の電荷が 2 価であることが、物質、および、電荷の保存を考える上で必ず考慮されなければならない。このため、上記の反応系は、保存則を意識させる上でより適切な反応例と言える。

1 価イオンと 2 価イオンのそれぞれの塩の場合で、保存則に基づいて必ず成り立つ関係式をまとめると表 1 となる。ここで、 C_s は水溶液に溶かした塩のモル濃度を、 $[X]$ は水溶液中に存在する化学種 X のモル濃度を表す。異なる化学種間で和が計算されているのは、共通のモル濃度の単位 [mol dm^{-3}] のもとで、各化学種の物質質量 (粒子の数) を相互に比較しているためである。式の両辺が等号で結ばれることは、反応系内の物質質量が反応前後で保存されていることを意味している。

表 1 「塩の加水分解」で成り立つ量的関係式

陽イオンの価数	1 価	2 価
塩	CH_3COONa	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
規則性	量的関係式	量的関係式
物質収支	$C_s = [\text{Na}^+]$	$C_s = [\text{Ca}^{2+}]$
	$C_s = [\text{CH}_3\text{COOH}] + [\text{CH}_3\text{COO}^-]$	$2 C_s = [\text{CH}_3\text{COOH}] + [\text{CH}_3\text{COO}^-]$
電荷均衡	$[\text{Na}^+] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{CH}_3\text{COO}^-]$	$2 [\text{Ca}^{2+}] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{CH}_3\text{COO}^-]$
プロトン収支	$[\text{CH}_3\text{COOH}] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-]$	

表 1 の物質収支は、(2) 式と (4) 式で溶解した塩のモル濃度が反応に関与しない陽イオンに反映されることと、(3) 式の酸塩基反応によって酸が化学形を変化させても、総量は保存されて変化しないことを表している。電荷均衡は、各イオンが持つ電荷の溶液全体での総和は、陽イオンと陰イオンで均衡しており、元の塩の電荷 0 が水溶液全体では保存されることを意味している。プロトン収支は、プロトン (H^+) 授受により生成するオキソニウムイオン (H_3O^+) と水酸化物イオン (OH^-) の数の増減、または、酢酸 (CH_3COOH) と水酸化物イオン (OH^-) の数の増減が一致しており、それらの物質質量が均衡していることを表している。この均衡関係は (1) 式と (3) 式の右辺から見て取ることができ、右辺は H_3O^+ と OH^- 、および、 CH_3COOH と OH^- が同量ずつ増減することを表している。表 1 に示された、1 価と 2 価の各系における 4 つの式が普遍的に成り立つ式である。これらの式は、化学平衡にあらうがなかろうが常に成り立つ式であることに注意を払う必要がある。すなわち、非平衡から平衡に至るどの過程においても成立する関係であり、あらゆる反応進行度で成立する。逆に言えば、平衡状態とは、反応進行度が 0 から 1 の間に存在するあらゆる可能性のうちの一つの状態を指し示している。

高等学校「化学」における「塩の加水分解」では、酢酸イオンの加水分解反応により、酢酸ナトリウム水溶液は弱塩基性を示すが、定性的に説明される²⁾。この化学現象は、溶液成分の量的関係

が $[\text{H}_3\text{O}^+] < [\text{OH}^-]$ となることの反映であり、表 1 のプロトン収支の式 $[\text{CH}_3\text{COOH}] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-]$ と直接、関連付けられる。すなわち、加水分解反応により CH_3COOH が生成した分だけ、 OH^- が H_3O^+ よりも常に多く存在することを、プロトン収支の式は意味している。このように、保存則と化学量論に基づく表 1 の量的関係式を取り扱うことができれば、単に定性的な理解に止まらず、定量的により深く理解することが可能となる。

3. 分子模型の製作

材料として、桧角材（15 mm 角）、フェライト磁石（ケニス， ϕ 6 mm $\times$ 2 mm，磁束密度 105 mT），テプラ[®] ラベル（キングジム，12 mm 幅，白，ピンク，赤，黄，オレンジ）を準備した¹⁰⁾。工具として，卓上型電動糸鋸（キソパワーツール，No.27088）と卓上型ボール盤（キソパワーツール，No.28128）を用いた¹¹⁾。

卓上型電動糸鋸を用いて，桧角材をイオン種に応じて規定の長さに切断した。次に， ϕ 6 mm のドリルを付けた卓上型ボール盤を用いて，切断面中央に深さ 2 mm の穴を穿ち，フェライト磁石を埋め込んだ。桧角材の側面に化学式を黒で印字したテプララベルを貼り付けて，分子模型とした。

水素イオン (H^+)，ナトリウムイオン (Na^+)，カルシウムイオン (Ca^{2+})，水酸化物イオン (OH^-)，酢酸イオン (CH_3COO^-) の 5 種類のイオン種それぞれの角材の長さは，15 mm，22.5 mm，22.5 mm，30 mm，および，45 mm とし，各イオンのイオン半径の大小関係と一致するようにした。またラベルの色をそれぞれ，白，黄，オレンジ，ピンク，赤と違って区別しやすいようにした。陽イオンである水素イオン，ナトリウムイオン，カルシウムイオンの表面が N 極，陰イオンである水酸化物イオンと酢酸イオンの表面が S 極となるように磁石を埋め込み，同符号のイオン同士は反発し合い，異符号では接着するようにして，イオン結合などの化学結合を模擬的に再現した。水酸化物イオンは 2 個の水素イオンと結合してオキソニウムイオン (H_3O^+) を，カルシウムイオンは 2 個の酢酸イオンと結合して塩を生成するため，各イオンの模型 1 個あたりに 2 個の磁石を，断面と側面 (OH^-)，または，断面と反対側断面 (Ca^{2+}) に取り付けた。図 1 に作製した分子模型を示す。

塩の水溶液を模した分子模型群として，溶媒である水分子の模型 10 個と溶質の塩である酢酸ナトリウム (CH_3COONa) 5 個¹⁰⁾，または，酢酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) 3 個¹¹⁾ を用いた。酢酸ナトリウム水溶液の分子模型群を図 2 に示す。

4. 授業実践の方法

本研究における授業実践の狙いは，分子模型を操作する演習を通して，学習者が化学反応式で成り立つ量的関係を溶液全体に拡張して適用し，溶液全体での量的関係の規則性を自ら発見し，それを具体的な数式として表現することである。この学習を通して，真の意味で保存概念を理解し，その概念を自分のものとして自由に操作できる段階にまで，学習者の能力を引き上げることを目的とした。

演習で用いる教材として，複数個の分子模型を集めて，多数の溶質と溶媒の分子から成る水溶液を模型化したもの（図 2）を用いた。この水溶液の模型を操作することで，化学反応式において単一粒



図1 分子模型



図2 水溶液を模した分子模型群

子間で認められる量的関係の規則性が, 多粒子系においても同様に成立することを示すことができる。すなわち, 水溶液の模型により, 規則性を化学反応式から水溶液へ拡張させることを狙いとしている。

溶液全体での量的関係の規則性を自ら発見し, それを具体的な数式として表現するために, 2種類のワークシートを分子模型と共に用いた¹¹⁾。1つのワークシートは, 化学反応式の反応を分子模型の操作で再現した際に生じた, 各化学種の数の結果を記録する表である。複数の分子が相互に反応し合う溶液系では, 反応の進行度の違いによって, 化学種の数の組み合わせのパターンが何種類にも上る。水分子10個と酢酸ナトリウム5個では, 数の組み合わせのパターンは理論的に27種類になる^{11, 12)}。それら多数の組み合わせパターンを記録したこの表を, 本研究では反応パターン表と命名した。図3に反応パターン表の記載例を示す。もう1つのワークシートは, 反応パターン表から見いだした, 化学種の量的関係の規則性を, 数式または文章で表現するための紙面である。これら2種類のワークシートの狙いは, 化学反応式と分子模型操作を手がかりに, 化学種間の量的関係に潜む規則性を発見させ, それを量的関係式として立式させることである。

図4に授業実践の流れを示した。最初に, 1価陽イオン (Na^+) の系を題材にして, 化学反応式と量的関係の意味を, スライドを用いて講義形式で説明した。説明では, 化学反応式の両辺で物質収支, 電荷均衡, プロトン収支の量的関係が成り立つことを強調して説明した。また, 各化学種の濃度 $[\text{X}]$ の表現方法とその意味についても説明した。続いて, ナトリウム塩の1価陽イオンの系について, プレテスト, 分子模型を用いた演習, ポストテストの順で授業実践を行った。引き続き, その応用であるカルシウム塩の2価陽イオンの系の授業実践を同様に行った。

演習は基本的に, 2, 3人で一教材を共同して利用するグループワーク形式, かつ, 分子模型を操作しながら互いに議論し合うアクティブ・ラーニング形式により行った。一方, プレテストとポストテストは個人で解答させた。

演習を始めるにあたっては, 分子模型の操作方法と2種類のワークシートの使い方を説明した。演習中にグループ内で議論が進まない場合は教員が示唆を与えたが, 反応パターン表から量的関係の規則性を見つけ出すこと, 化学反応式で成り立つ量的関係に立ち返って考えることを促す程度に留めた。

プレテストとポストテストは, 演習前後でのテスト得点の差異から, 演習を通しての理解度の向上を客観的に測定することを目的として行った。このため, 各イオン系で用いたプレテストとポストテストは同一の問題とした。ただし, ポストテストに影響しないよう, プレテストの問題・解答用紙はプレテスト終了後に直ちに回収し, 記録させないように注意を払った。いずれのプレテスト, ポスト

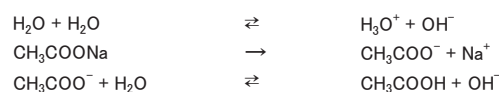
テストも 12 個の数式の正誤を○×で答える形式とした。1 価イオンの系のテスト問題は○を正答とする式が 4 式、×を正答とする式が 8 式から成る構成で、表 1 で示した 4 式が正答となるようにした。一方、2 価イオンの系のテスト問題は○を正答とする式が 2 式、×を正答とする式が 10 式から成る構成で、1 価との違いを理解しているかを判別する目的で、係数 2 が乗ぜられていない誤った式を敢えて 2 式出題した。正誤の客観性を高めると同時に、結果の解析を容易にすることを意図して、解答形式は○×式と単純にした。

受講者ごとのプレテストとポストテストの得点の差を算出し、各人の理解度の向上を計測する目的で、着座した各受講生に番号を任意に割り振り、その番号が記載されたテスト用紙を配布した。ただし、番号と個人名は連結させず、各個人の得点が記録できないようにして、個人情報に配慮した。

授業実践は、学部または大学院の通常の授業 3 回分を使い、計 15 名の受講生を対象に行った。重複して受講した学生はいなかった。実施した授業実践の一覧は表 2 の通りである。

塩の加水分解

化学反応式



Cs : 溶かした塩 (CH_3COONa) のモル濃度

[X] : 溶けている化学種 X のモル濃度

Cs	[H_3O^+]	[OH]	[Na^+]	[CH_3COOH]	[CH_3COO^-]
5	5	5	5	0	5
5	0	0	5	0	5
5	1	3	5	2	3
5	2	3	5	1	4
5	3	6	5	3	2
5	2	4	5	2	3
5	4	4	5	0	5
5	1	2	5	1	4
5	3	4	5	1	4
5	2	6	5	4	1

図 3 ワークシートの反応パターン表の記載例

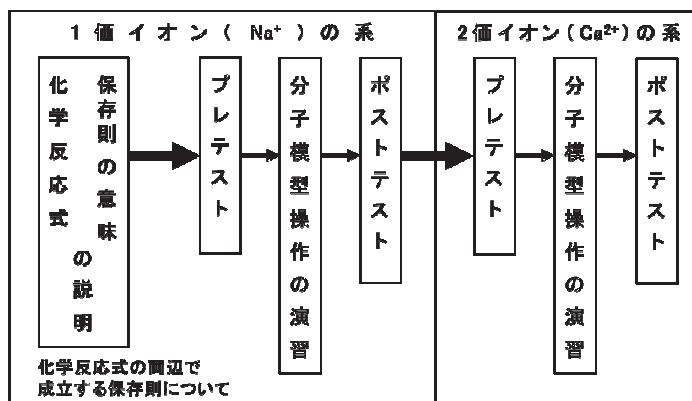


図 4 分子模型教材を用いた授業実践の流れ

表 2 授業実践を行った授業一覧

授業実践	1 回目	2 回目	3 回目
授業科目名	理科教育教科内容論Ⅱ	環境分析化学実験	理科教育実践特別演習Ⅰ
実施日時	2018 年 10 月 30 日	2018 年 12 月 20 日	2019 年 5 月 7 日
所要時間	90 分	90 分	90 分
受講者数	6 名	1 名	8 名
受講者内訳	教育学研究科修士課程 理科教育専修 1 回生	教育学部教員養成課程 理科領域専攻 3 回生	教育学研究科修士課程理科 教育専修 1 回生、研究生
授業形式	グループワーク (3 人 2 グループ)	個人ワーク	グループワーク (2, 3 人 3 グループ)

5. 授業実践の評価

3回の授業実践の受講生計15名を対象とした、プレテストの正答率とポストテストの正答率の相関関係を表したグラフを図5に示す。グラフ中央の斜線は、プレテストとポストテストの正答率が同じ場合を示し、斜線より上の点は演習により正答率が上がった者、下は正答率が下がった者を表す。1価の系では全ての受講生で正答率が上昇した。2価の系では、一部に正答率が下降した受講生がいたものの、ほとんどの受講生で正答率の上昇が認められた。図6は正答率の頻度分布を表す。ポストテストはプレテストに比較して、全体的に正答率が高くなる傾向が見られた。これは、分子模型を用いた演習の効果が表れていることを示唆している。

さらに、評価テストの結果を規格化ゲイン g を用いて解析した。規格化ゲインを用いれば、3回の授業での違いや学生間の違いなどの母集団の違いを超えて演習の効果を比較することが可能である¹³⁾。 g を求める式を以下に示す。

$$g = \frac{n_{\text{post}} - n_{\text{pre}}}{12 - n_{\text{pre}}} \quad (5)$$

(5) 式の n_{pre} は、プレテストにおける12問の問題中の正答数を表し、 n_{post} は、ポストテストにおける12問の問題中の正答数を表す。 g は誤答が正答に変化した割合を示し、演習の効果を表す1つの指標となる。 g の頻度分布を図7に示す。ただし、プレテストにおいて12問全てにおいて正答し n_{pre} が12となった場合は、 g を算出することができないので除いてある。このため、人数の合計が15よりも小さくなっている。1価イオンの系での g の平均値と標準偏差は、それぞれ0.49と0.36、2価イオンの系では0.44と0.47であった。 g の平均値は0.5より小さく、一定の正答率の向上は認められたものの、完全に理解できていない状況

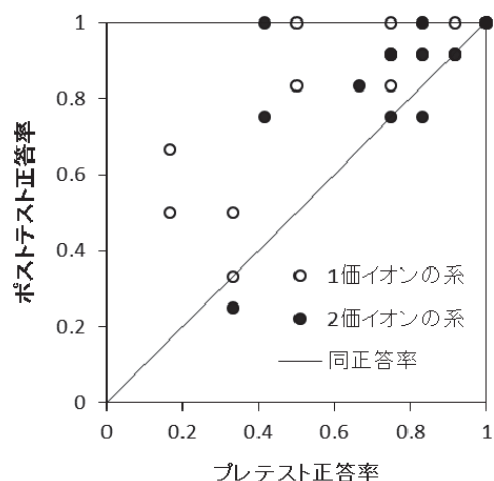


図5 評価テストの正答率の相関関係

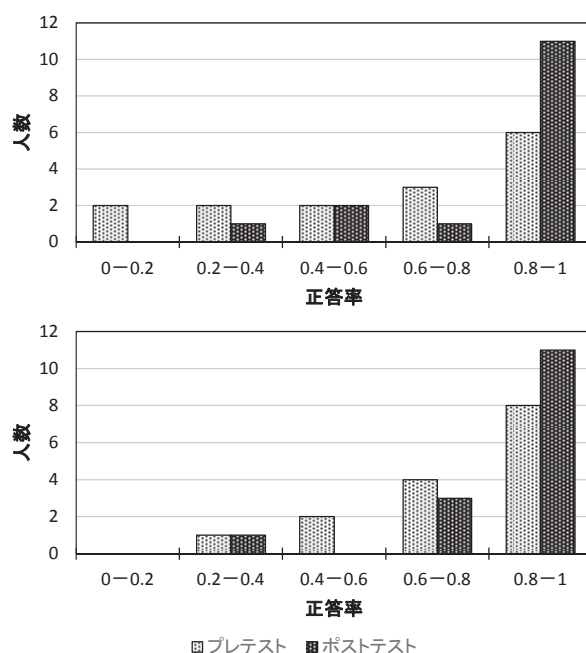


図6 正答率の頻度分布
上は1価イオンの系，下は2価イオンの系

が見て取れる。また標準偏差が大きいことから、個人差による違いが大きいことが示された。特に2価イオンの系では、ポストテストで正答数が減って g が負になる場合もあり、2価イオンの系で思考が混乱してしまったようにも窺える。

直接、受講生から聞き取りを行ったわけではないが、グループワークを通して記入されたワークシートの記述、および、演習時の様子から、反応パターン表から帰納的に量的関係の規則性を見つけ、その規則性に化学反応式から演繹的に意味づけをしている様子が窺われた。

以上の解析を踏まえると、化学反応式における量的関係の抽象的な保存概念と具体的な分子模型操作を用いて、量的関係性を化学反応式から反応系全体に拡張して理解することが、抽象と具象の往還、または、演繹と帰納の往還を通して、自立的に達成可能であることが、ある程度、示されたと考える。

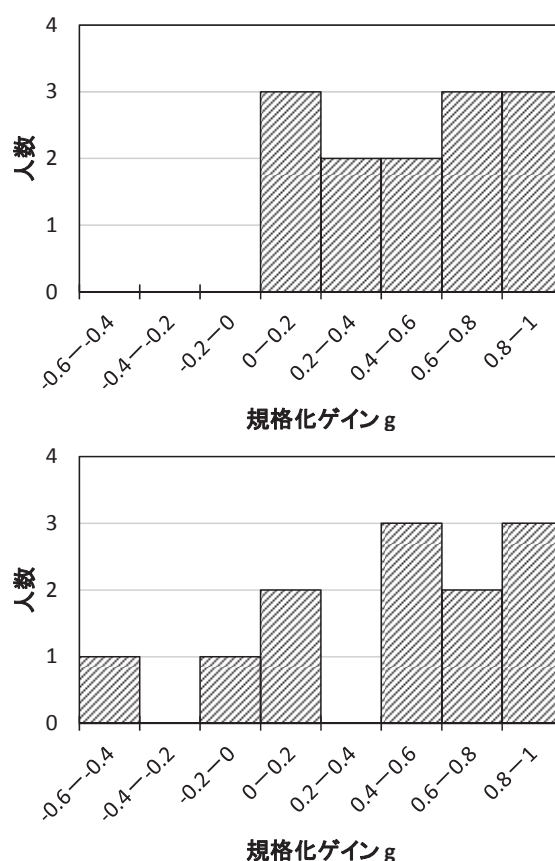


図7 規格化ゲイン g の頻度分布
上は1価イオンの系、下は2価イオンの系

6. 分子模型の教授方略における位置づけ

和田らは、理科学習における生徒の思考・表現は、言葉のみならず、表やグラフ、図や数式など、極めて多様な表象の要素が相互に関連し合うことによって具体化されると指摘している¹⁴⁾。ここで表象とは、教材などの外的な表象だけでなく、それが思考の過程で内化され、イメージや言葉などの心的な表現として現れる内的な表象も含んでいる。理科学習においては、3つの表象形式を相互に行き来することが科学概念の構築過程に有効であると考えられている。3つの表象形式とは、活動的表象、映像的表象、記号的表象である。Gilbertが指摘する表象の次元要素から見れば、活動的表象は実体モデルなどの3次元(3D)の要素、映像的表象はイメージやグラフなどの2次元(2D)の要素、記号的表象は記号や数式などの1次元(1D)の要素から成るとされる^{14, 15)}。これら3つの表象が相互に関連し合う表象ネットワークを形成し、表象ネットワークの中での表象の移行が思考・表現活動を活性化せるとされる。本研究においては、操作型分子模型、反応パターン表、化学反応式を、活動的表象(3D)、映像的表象(2D)、記号的表象(1D)それぞれに位置づけることができる。図8で化学反応式、反応パターン表、および、操作型分子模型の関係性を、表象ネットワークに当てはめて示した。

操作型分子模型を用いた演習を通して、これら表象間の相互移行がグループ内の表現活動で、或いは、各人の思考活動で促進され、自立的に学習が進められたと考えている。以上の観点から見れば、プレテストとポストテストから成る評価テストは、教材として用いた外的な表象が、受講生の思考の中で内化され、自らの思考の中で自由に操作可能な内的な表象の段階に達しているかどうかを測定したものと捉えることができると思う。

本授業実践では、分子模型教材を通して、量的関係への自発的な気づきを得ることを狙いとした。一方、この分子模型を、高等学校「化学」における「塩の加水分解」の理解を深めるための教材として活用することも有効であると考え。「塩の加水分解」では、酢酸イオンの加水分解反応により液性が弱塩基性となることが説明される。この現象は、弱酸の塩の水溶液において常に $[\text{H}_3\text{O}^+] < [\text{OH}^-]$ となることを意味している。図3の反応パターン表を見れば、 $[\text{H}_3\text{O}^+] \leq [\text{OH}^-]$ の量的関係が常に示されている。 $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-]$ となるのは、加水分解反応を起こさなかった場合のみである。また、加水分解反応により生じた $[\text{CH}_3\text{COOH}]$ の数の分だけ、 $[\text{OH}^-]$ の数の方が $[\text{H}_3\text{O}^+]$ の数よりも多いことが示されている。すなわち、反応パターン表から、酢酸イオンの加水分解反応に起因して $[\text{OH}^-]$ が $[\text{H}_3\text{O}^+]$ より過剰となり、水溶液が塩基性を示すことが具体的に確認できるのである。活動的表象である分子模型の操作と、それにより得られる映像的表象である反応パターン表を共に用いれば、溶液全体における量的関係を、具体的な表象として眼前に示すことができる。それを手掛かりにすることで、より抽象度の高い内的な表象である液性の変化という概念、または、最も抽象度の高い記号的表象である量的関係式が、より理解しやすくなるものとする。

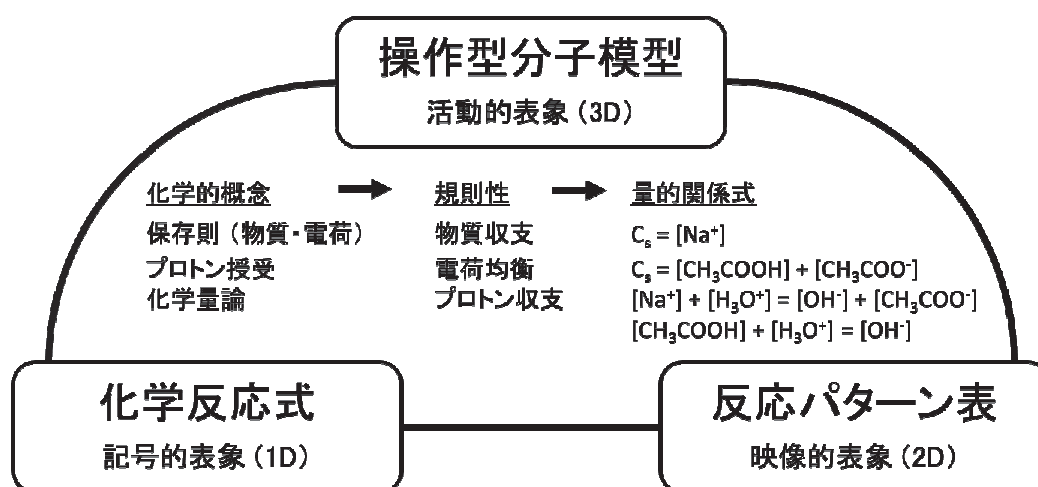


図8 表象ネットワークとしての化学反応式、反応パターン表、および、操作型分子模型の関係性

7. おわりに

本研究では、化学反応を擬似的に再現する操作型の分子模型を用いた演習を考案し、その授業実践を行った。さらに、演習の効果を、演習前後のプレテストとポストテストで定量的に評価した。分子模型を操作する演習を通して、学習者が量的関係を自ら発見することができたことが、演習時のワー

クシートへの記述や、演習後のポストテストの得点上昇から確認することができた。操作型分子模型を用いることで、酸塩基反応における化学種間の量的関係に自ら気づかせる自立的な学習が可能であり、その有効性が定量的評価から認められたと考える。分子模型による活動的表象、反応パターン表による映像的表象、および、化学反応式による記号的表象の表象間の移行と往還により、より抽象度の高い記号的表象である量的関係式への気づきへと繋がると考察された。

本研究では、演習において教員が積極的な介入は行わず、受講生の自主性に任せた。その結果、理解度の向上には大きな個人差が見られ、また、2価イオンの系での理解には混乱も認められた。時間的制約がある実際の授業の中で受講生の理解度を高めるためには、演習中に教員がより積極的に示唆を与える、或いは、分子模型の操作を通して量的関係を説明することも、分子模型を用いた教授方略の一つとして考えておくべきであると思われる。

高等学校の「化学」においても、物質収支や電荷均衡を踏まえた化学平衡計算の活用は、学習の幅を広げる1つの道具として意義があると考ええる。実際、SSHの活動ではあるが、天然水中の無機炭素濃度の分析に化学平衡計算を応用した学習例がある^{10, 16)}。化学反応の動的な過程を模擬的に扱える操作型分子模型は、こうした高等学校の「化学平衡」の学習にも役立つものと期待される。

参考文献

- 1) 向井浩・山本哲生・山根良行, 「表計算ソフトを用いた酸塩基平衡の計算とシミュレーションー水溶液のpHと中和滴定曲線ー」『化学と教育』, 53 (12), 2005, pp.714-717。
- 2) 竹内敬人 他, 『化学』東京書籍, 2013, pp.170-172, pp.173-174。
- 3) 宗林由樹・向井浩, 『基礎分析化学』サイエンス社, 2007, p.50。
- 4) 池平秀行・佐藤和久, 「有機化合物の分子模型についてー分子模型の種類と特徴ー」『化学と教育』, 49 (10), 2001, pp.637-642。
- 5) 和田敬行・大橋淳史, 「学習の理解を容易にする結晶構造モデル教材の開発」『愛媛大学教育学部紀要』, 62, 2015, pp.147-154。
- 6) 野口卓也・鎌田正裕, 「原子の「重さ」や「大きさ」を表現したモデル教材」『科学教育研究』, 36 (1), 2012, pp.38-43。
- 7) 小倉恭彦・藤井浩樹, 「生徒の化学変化についての理解を促すための指導法の考案ー中学校2年「物質の分解と原子・分子」の内容において」『理科教育学研究』, 54 (1), 2013, pp.105-115。
- 8) 星野由雅・田浦正典, 「大学初学者向け化学教材の開発1ー磁石を用いた共有結合モデルー」『長崎大学教育学部紀教科教育学』, 47, 2007, pp.13-20。
- 9) 竹内敬人 他, 『化学基礎』東京書籍, 2012, pp.124-130。
- 10) 小野聖太, 「高校化学における「塩の加水分解」に関する分子模型教材の検討」平成22年度京都教育大学修士論文副論文, 2011。
- 11) 山本勇仁, 「化学反応の量的理解を支援する分子模型教材に関する研究」平成30年度京都教育大学修士論文, 2018。
- 12) 向井浩, 「分析化学における化学平衡計算をいかに教えるかー簡易分子模型と表計算ソフトの利用ー」『海洋化学研究』, 28 (2), 2015, pp.77-81。

- 13) R. Hake, “Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses”, *American Journal of Physics*, 66 (1), 1998, pp.64-74.
- 14) 和田一郎・長沼武志・森本信也, 「子どもの理科学習における表象移行を促進する教授方略に関する事例的研究」『理科教育学研究』, 56 (2), 2015, pp.235-247.
- 15) J. Gilbert, *Visualization.Theory and Practice in Science Education*, Springer, 2008, pp.3-24.
- 16) 向井浩・前早織, 「理論中和滴定曲線のカーブフィッティングによる無機炭素（炭酸・炭酸水素イオン）濃度の決定—SSHでの実践—」『化学と教育』, 5 (8), 2010, pp.376-379.