

# 高等学校化学におけるモデルの分類と科学概念構築過程との関連

教育デザインコース 理科領域  
一ノ瀬 友輝  
神奈川県立上溝南高等学校  
平瀬 健太郎  
教育学研究科  
和田 一郎

## 1. 問題の所在と研究の目的

一般に理科学習では、観察、実験を起点に自然事象に対する解釈を進め、科学概念を構築していくことになる。特に高等学校化学では、微視的な世界や事象を抽象化して扱うことになる。そのため、科学的に探究する手段の一つとして「モデル」が用いられる。後述する通り、理科学習におけるモデルとは、自然事象の原理を要約し単純化した表現であるとともに、事象を心的に捉える際の道具である。モデルには、例えば、イメージによる粒子モデル、グラフや化学反応式などが含まれる。学習過程において学習者はそうした様々なモデルを「心的に表現(表象)」しながら学習を進めていく。こうした表象には活動・映像・記号の3形式あり、これらの相互関連の深まりが科学概念構築の過程に大きく影響する<sup>1)</sup>。このとき、これらの表象形式の相互関連にモデルが媒介としての役割を果たす。

しかし、例えば平成27年度全国学力学習状況調査(中学校理科化学的領域)での「入浴剤とベーキングパウダーを科学的に探究する」設問のうち、「同じ量の炭酸水素ナトリウムと硫酸ナトリウムのそれぞれに同じ量の水を加えたとき、どちらが炭酸水素ナトリウムであるかを選ぶ」という設問の正答率は33.4%と際立って低い結果であった<sup>2)</sup>。この問題は、図と表を関連付け、さらに溶解度曲線などの種々のモデルを用いて思考することで解決が図られる。言い換えれば、生徒は多様なモデルを複

合的に関連付けて機能させる力を獲得できていない状況が明らかとなった。

こうした課題の解決のためには、実験による具体的な事象把握から、モデルを媒介として抽象化される科学概念構築過程の実態を精査する必要があると考えられる。

モデルの構築と表象の変換過程に関わり、和田・森本(2008)は、生徒によるモデル構築を通して知識の表象レベルの高次化が促進されることを明らかにした<sup>3)</sup>。また、和田・森本(2010)は、教師が生徒の表象内容を適切に視覚化することによって、表象の相互変換が円滑になることを指摘している<sup>1)</sup>。しかし、これらの研究では、どのような種類のモデルが表象レベルの高次化に寄与するのか、詳細な分析がなされているとは言い難い。

そこで本研究では、高等学校化学「化学反応の速さ」を事例に、多種多様なモデルが科学概念構築に関する表象移行の過程にどのような影響を及ぼすのかを検討した。

## 2. モデルの定義と分類

Schwarzら(2009)は、科学的なモデル(scientific models)を、「自然事象を説明したり、予測したりするために鍵となる特徴に着目することで、原理を要約し単純化する表現である」と定義している<sup>4)</sup>。また、Gilbertら(1998)は、科学的なモデルを「考えや事象、プロセスの一つの表象である」と定義した<sup>5)</sup>。これらから、本研究では理科学習におけるモデルを、「自然事象の原

表1 モデルの種類と概要

モデルの種類	概要
記号的モデル	記号的に表したモデル
数学的モデル	方程式やグラフ(数量関係に着目)で表したモデル
映像的モデル	視覚的に表したモデル
概念プロセスモデル	1つの概念に対する複数の考えを表すモデル(どの側面から事象を捉えるのかによって異なるモデル)
理論的モデル	概念プロセスモデルを総括したモデル

理を要約し単純化した表現であるとともに、事象を心的に捉える際の道具である」と捉えた。

また、Harrison・Tregust (2000) は、特に化学では複数の種類のモデルが存在することを指摘している<sup>6)</sup>。その各モデルの概要を表1に示す。具体的には、化学のモデルは、記号的モデル (symbolic models)、数学的モデル (mathematical models)、映像的モデル (iconic models)、概念プロセスモデル (concept-process models)、理論的モデル (theoretical models) に分類される。記号的モデルとは、化学反応式のように、反応機構を記号的に表したモデルである。数学的モデルとは、方程式やグラフのように、数量関係に着目して表したモデルである。映像的モデルとは、粒子をイメージで表すといった、視覚的に表したモデルである。概念プロセスモデルとは、どの立場から事象を捉えるかといったような、一つの科学概念に対する複数の考えを表すモデルである。例えば、酸・塩基の概念に対してアレニウスの定義、ブレンステッドの定義、ルイスの定義の3つの捉え方があり、それぞれが酸・塩基に対する概念プロセスモデルであると言える。理論的モデルとは、酸・塩基の枠組みを関連付けること、つまりそれぞれの概念プロセスモデルを総括したモデルである。

生徒は、図1に示すように、記号的モデルや数学的モデル、映像的モデルを組み合わせ、事象の一側面である概念プロセスモデルを構築し、それを包括した理論的モデルを構築することで、科学概念構築を果たすと捉えることができる。

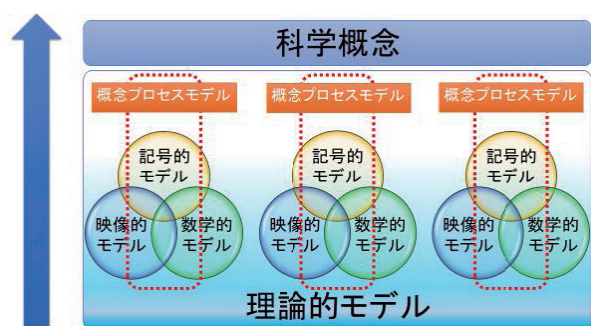


図1 モデルの種類と科学概念構築の関連

### 3. 理科学習における表象の位置づけ

前述したように、表象とは端的に述べれば心的な表現である。これに関して、学習者の知的発達につい

て、その質的過程に着目した Bruner の表象形式の論は有益な視点である。これによれば、学習者の表象形式は、活動的表象 (enactive representation)、映像的表象 (iconic representation)、記号的表象 (symbolic representation) の3種類からなる<sup>7)</sup>。理科学習における活動的表象とは、観察、実験を通じた事象把握にあたる。映像的表象とは、視覚的に事象を把握する段階である。記号的表象とは、最も抽象的であり、化学反応式で表記する、あるいは言葉で説明する段階の表象である。和田・森本 (2008) は、上述したような各表象の有機的な結びつきが科学概念構築には重要であることを明らかにした<sup>3)</sup>。さらに和田・森本 (2010) は、表象ネットワークモデル (図2) を提唱し、各表象の相互関連の様相を示した<sup>1)</sup>。活動的表象、映像的表象、記号的表象の相互変換をダイナミックに稼働させ、意味のまとまりを有することで科学概念構築の達成を示すものである。本研究では上述した各種モデルが心内において、こうした表象移行を促す機能を有すると捉えた。

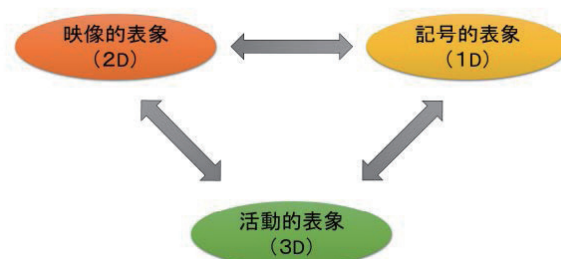


図2 表象ネットワークモデル

## 4. 高等学校化学における事例的分析

### 4.1 分析方法

本研究では、図1及び図2に示した視点に基づき、高等学校化学「化学反応の速さ」の単元を事例として授業を分析した。ここでは生徒が、各種モデルを通じた学習を進める中で、科学概念構築に関する表象の移行過程の実態を捉えた。

したがって、授業事例の分析では、教師が板書によって示したモデルや生徒のワークシートにおけるモデルを示した。この表現から、各種モデルと表象ネットワーク構築について分析を行った。なお、本稿で示している事例には、複数の生徒の事例を取り上げている。

#### 4.2 実施時期、実施対象及び実施単元

本授業実践は、2015年12月～2016年1月に実施された。この授業は、神奈川県内の高等学校第3学年13名を対象とした。実施単元は「化学反応の速さ」を取り扱った。

#### 4.3 授業実践の概要

本授業実践は、高等学校化学の単元「化学反応の速さ」に関する学習のうち、化学反応の速度の表し方と化学反応速度を変える条件の学習を表2に示す内容で計画、実施（計7時間）した。

表2 学習内容の概要

次	時	学習内容
1	1	化学反応の速さに違いが出る要因について仮説を立てた。
	2	第1時で得られた仮説を確かめるにはどのような実験を行ったらよいかを検討した。その定義である反応速度とは何かについて学習した。 【単位時間あたりの濃度の変化分を捉える場面】
	3	反応速度の概念をグラフに表すことによって捉えた。そのグラフや構築した概念をもとに問題演習を行った。 【グラフから捉えた場面】
2	4	触媒の働きに関する実験を行った。具体的には、過酸化水素水と肝臓片、過酸化水素水と酸化マンガン(IV)の反応についての実験を行った。 【触媒に関する実験から事象を捉える場面】
	5	第4時の実験結果を受け、活性化エネルギーや触媒のはたらきについて学習した。 【モデルを通じて事象を捉える場面】
	6, 7	反応速度の諸要因についての実験とその考察を行った。具体的には、硫酸と鉄粉の反応を扱った。硫酸は、1 mol/L (25 °C), 1mol/L (50 °C), 3 mol/L (25 °C) の3本の試験管に用意し、それぞれに鉄粉を入れた。 【反応速度の諸要因に関する実験から事象を捉える場面及びモデルを通じて事象を捉える場面】

本稿では、表2の第1次、第2、3時及び第2次の学習を分析対象として取り上げる。

第1次では最初に、反応の速さの表し方を学習した。また、その反応速度をグラフから捉えた。次に第2次では、まず過酸化水素水と肝臓片の反応と、過酸化水素水と酸化マンガン(IV)の反応の実験を行った。そして、これらの反応について考察した。さらに、硫酸と鉄粉の反応の実験を行った。3種類の硫酸の入った試験管(1 mol/L (25 °C), 1 mol/L (50 °C), 3 mol/L (25 °C))を準備し、それぞれの試験管に鉄粉を入れ、硫酸と鉄粉の反応について考察した。ここでは、反応経路とエネルギーのモデルや、化学反応式などを用いて考察した。

#### 5. 結果及び考察

##### 5.1 「反応の速さの表し方」から捉える反応速度概念

###### (1) 単位時間あたりの濃度の変化を捉える場面

第2時において、生徒は反応の速さの表し方の学習を行った。この際のワークシートを図3に示す。まず教師は、物質の変化する要素に着目するように促した。ここでは、化学反応に影響する因子として、分子の形、性質、温度、物質質量、時間などが挙げられた。そこから、単位時間あたりの濃度の変化分が反応の速度であることを学習した。具体的には、図3のように数学的に表記したり記号的に表記したりしながら反応速度の概念を構築していった。図3の□の部分において、不完全な表現ではあるが、単位時間あたりの物質の濃度の変化分を数量的な変化分に着目して表した数学的モデル、及びその数量変化を記号的に表した記号的モデルが構築されたと考えられる。また、これらは反応速度を単位時間あたりの濃度変化で表せることを示した概念プロセスモデルを構築したとも捉えられる。

この段階の学習を、表象ネットワークの観点から捉えれば、図4に示すように記号的な要素が中心となり、生徒は活動レベルや映像レベルの表象が関連付かず、記号的表象のレベルでのみ事象を捉える学習が展開された場面であったと考えられる。

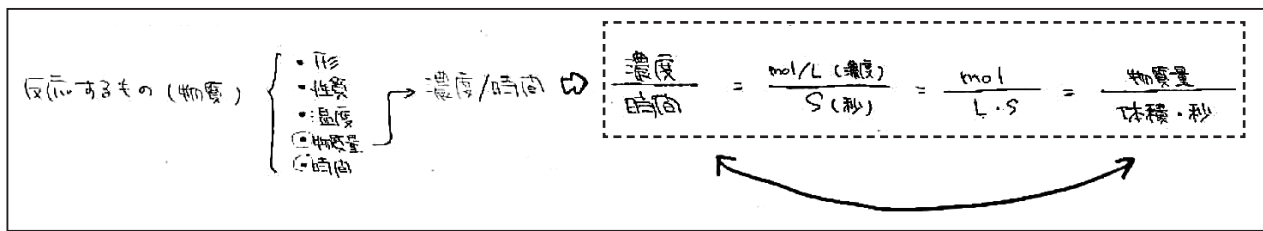


図3 反応の速さの表し方

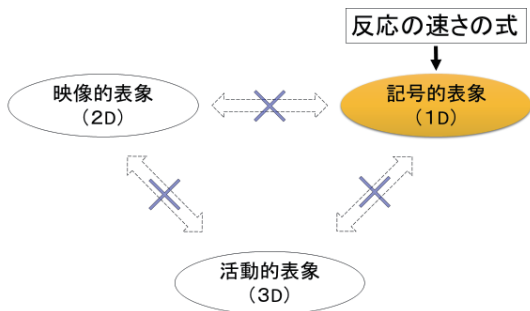


図4 記号的表象段階での捉え

(2) 単位時間あたりの濃度変化をグラフから捉えた場面

次に第3時において、反応速度の概念をグラフから捉えた。この際のワークシートを図5、図6、図7に示した。図5では、反応物をA、生成物をB、時間 $t_1$ におけるAの濃度を $[A]_1$ 、Bの濃度を $[B]_1$ 、時間 $t_2$ におけるAの濃度を $[A]_2$ 、Bの濃度を $[B]_2$ とし、生成物と反応物を、単位時間あたりの物質の濃度の変化分をグラフによって捉えている。この図5では、単位時間あたりの物質の濃度の変化分を視覚的に表した映像的モデル、またその数量変化に着目した数学的モデルが構築されたと考えられる。

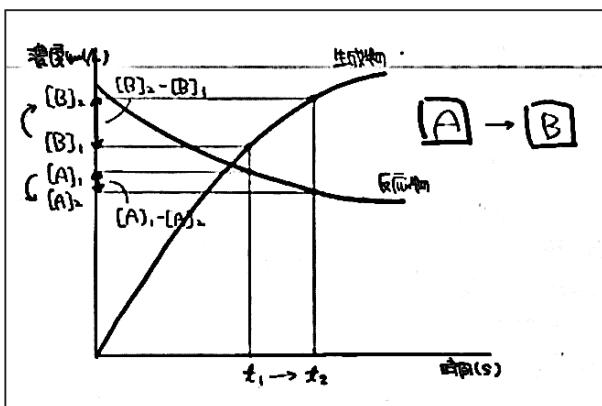


図5 単位時間あたりの濃度変化のグラフ

さらに図6では、反応物Aの減り方と生成物Bの増え方として、濃度の変化分を表現している。また図6は、この学習段階における生徒なりの考えが表現されたものであるため、不完全な表現であるが時間の変化と濃度の変化を用いて反応速度を捉えていることが分かる。反応物Aに関しては、時間の変化が $t_2 - t_1$ 、その単位時間あたりの濃度の変化が $[A]_1 - [A]_2$ である。すなわち $([A]_1 - [A]_2) / (t_2 - t_1)$ として反応速度を表すことができるという考えである。生成物Bについても同様である。これは、単位時間あたりの物質の濃度の変化分を数量的な変化分に着目して表した数学的モデルと捉えられると同時に、その数量変化を記号的に表した記号的モデルであるとも捉えることができる。図7も不完全な表現ではあるが、図5や図6を式や言葉によって説明した記号的モデルを構築したと考えられる。

**Aの減り方**

時間の変化:  $t_2 - t_1$   
 濃度の変化:  $[A]_1 - [A]_2$  (マイナス)  
 速度の表し方:  $\frac{[A]_1 - [A]_2}{t_2 - t_1} = v_A$

**Bの増え方**

時間の変化:  $t_2 - t_1$   
 濃度の変化:  $[B]_2 - [B]_1$   
 速度の表し方:  $\frac{[B]_2 - [B]_1}{t_2 - t_1} = v_B$

図6 反応物と生成物の反応速度の詳細



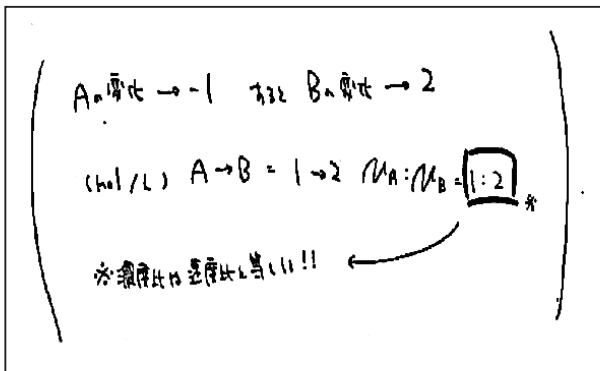


図7 反応物と生成物の関係性

この学習段階を表象ネットワークモデルの観点から捉えれば、図8に示すように、複数のモデルによって記号的表象と映像的表象の関連が促されたと考えられる。具体的には、図6, 7のような記号的表象段階での捉えから、図5のような数学的・映像的モデルを用いることで、記号的表象と映像的表象の関連付けが促進されたと考えられる。

このようにして、単位時間あたり物質の濃度の変化分から反応速度を捉える一つのプロセスモデルを構築していったと考えられる。

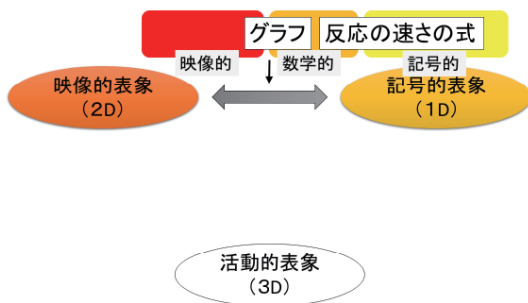


図8 記号的表象から映像的表象への移行

第3時の問題演習後、教師は反応速度式を示した(図9)。これは、反応速度定数  $k$  と水素の濃度  $[H_2]$ 、及びヨウ素の濃度  $[I_2]$  の積が反応速度になるという数学的モデル、及び反応速度を記号的に表している記号的モデルを提示した場面である。さらには、反応速度を反応速度定数と物質の濃度の積になるという捉え方をした新たな概念プロセスモデルが提示されたと考えられる。生徒はこのモデルが意味することについて次に検討していった。

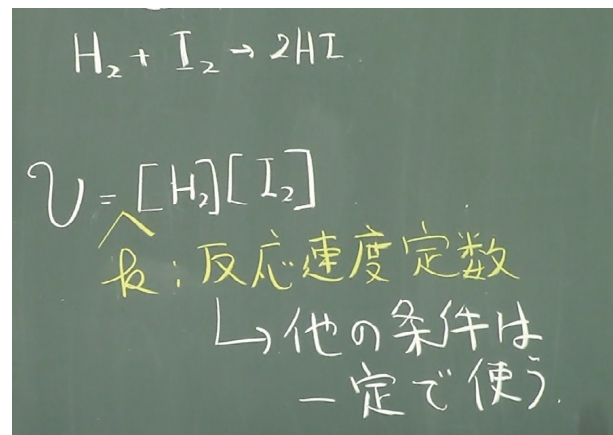


図9 反応速度式

## 5.2 「反応速度式」から捉える反応速度概念

### (1) 触媒の影響を捉える場面

第2次、第4時において過酸化水素水と肝臓片、及び過酸化水素水と酸化マンガン(IV)の反応に関する実験を行った。この実験において肝臓片と酸化マンガン(IV)は触媒のはたらきをし、両反応とも瞬時に分解が進み酸素を発生することを捉えた。

ここでの学習は、表象ネットワークモデルの観点から捉えれば、生徒は実験を通じた活動的レベルで事象を把握したと考えられる(図10)。なお、ここでは映像レベルや記号レベルでの表象の関連付けはなされていないと考えられる。

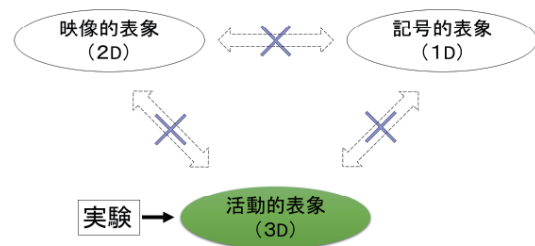


図10 触媒に関する実験を受けての活動的表象

第5時では、教師は粒子同士が衝突することで反応が起こるが、反応物が十分なエネルギーをもって、衝突しなければならないことを教授した。生徒は、この反応における経路とエネルギーのモデルについて、「水素とヨウ素とが反応してヨウ化水素になるとき、水素とヨウ素が十分なエネルギーをもって、結合の形成に都合のよい衝突をしなければならず、そのような条件で衝突すると、エネルギーの高い不安定な状態ができる。この状態を活

性化状態ということ」「反応物が生成物になるときは、このような活性化状態を経由すること」「活性化状態になるときに必要な最小のエネルギーを活性化エネルギーということ」などの観点から考察した。

この際、教師は上記の内容を図で表して考察することを促した。また、反応経路において水素とヨウ素が分子状態で存在する場合、原子状態で存在する場合、生成物となった場合の安定性に注目させた。図11のモデルは、生徒がワークシートに表現した一例である。ここでは、粒子によるイメージと反応経路を視覚的に捉えることができる映像的モデルであり、活性化エネルギーと反応熱の関係も数量的に捉えることができる数学的モデルが構築されたと考えられる。

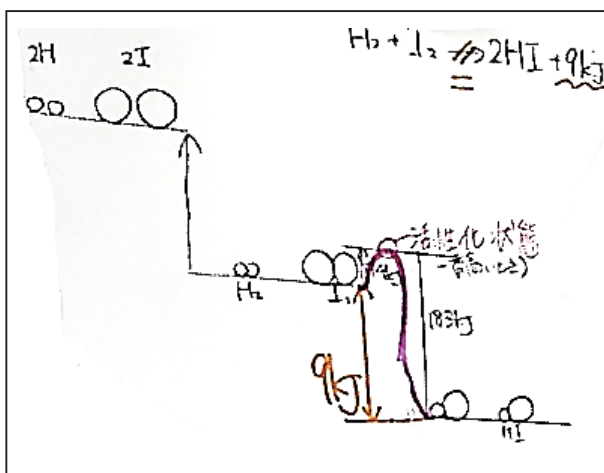


図11 反応経路とエネルギーのモデル

さらに教師は、反応速度と活性化状態の関係性に注目するよう促した。これを受けて生徒は、図12のような触媒のはたらきに関するモデルを構築し、触媒が活性化エネルギーの低い反応経路をつくり、反応速度を大きくする機能を有することを捉えた。ここでは、触媒のはたらきを視覚的に捉えることのできる映像的モデル、及び活性化エネルギーの数値に着目した数学的モデルの構築を実現したと考えられる。

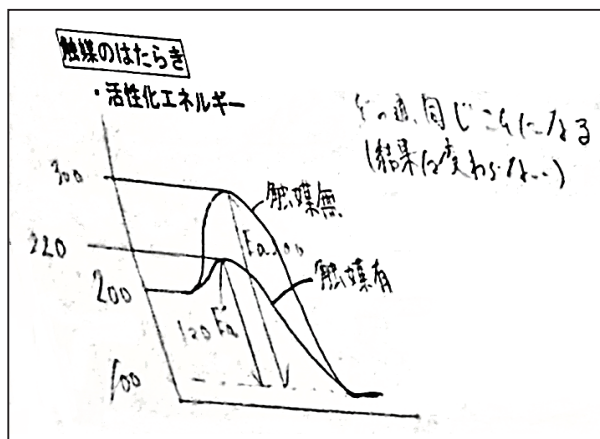


図12 触媒のはたらきのモデル

ここでの学習活動は、表象ネットワークモデルの観点から捉えれば、図13に示すように、これらの映像的・数学的モデルによって活動的表象と映像的表象への関連付けが促進されたと考えられる。

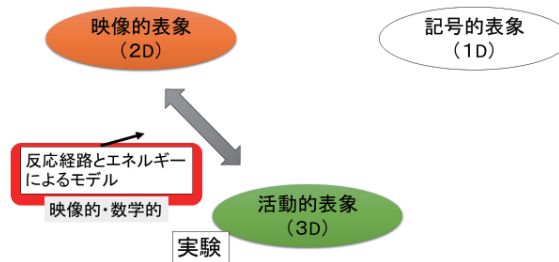


図13 活動的表象から映像的表象への移行

最後に、教師は過酸化水素水の分解の化学反応式を示した。生徒は、これを受け、図14の[ ]のように映像的モデルに記号的モデルである化学反応式を加えモデルを再構築した。

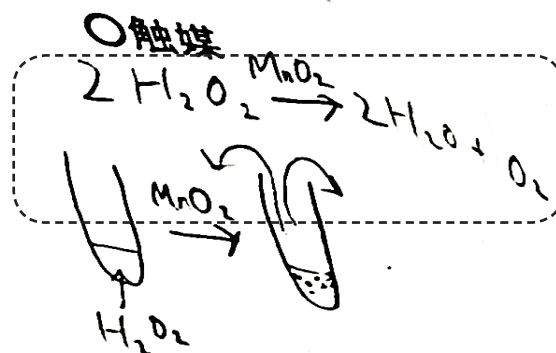


図14 触媒を使った化学反応式

この学習活動は、表象ネットワークモデルの観点から捉えれば、図15に示すように、この化学反応式による記号的モデルによって映像的表象から記号的表象への関連付けが促進されたと考えられる。この結果、最終的に上述した各種モデルが機能して3つのレベルの表象の相互連関が成立したと考えられる。

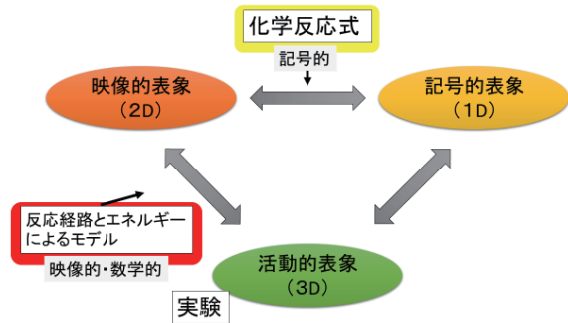


図15 3つのレベルの表象の相互連関

(2) 温度の影響を捉える場面

第6,7時では、硫酸と鉄粉の反応を例に反応速度に対する温度の影響について検討した。3種類の硫酸の入った試験管、(1 mol/L (25 °C), 1 mol/L (50 °C), 3 mol/L (25 °C))を準備し、それぞれの試験管に鉄粉を入れた。結果として、温度が高いほど反応速度が大きくなること、また濃度が高いほど、反応速度が大きくなることを見出した。

この学習段階を表象ネットワークモデルの視点から捉えれば、図16のように、この実験を通じて生徒は活動レベルで事象を把握したと考えられる。

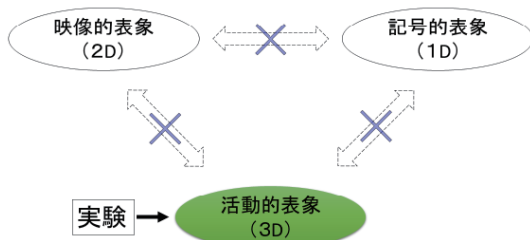


図16 対象実験を受けての活動的表象

その後、考察の場面へと進んだ。ここで教師は、温度と活性化エネルギーの関係性に着目するよう促した。そして反応経路とエネルギーについて、「温度が上がると活性化状態にたどりつくまでのエネルギーが増加する」と説明を加えた。これを受けて、生徒は図17のように、

温度が上がると活性化エネルギー以上のエネルギーをもつ分子の割合が増加することを視覚的に捉えることができる映像的モデルを構築することが可能となった。

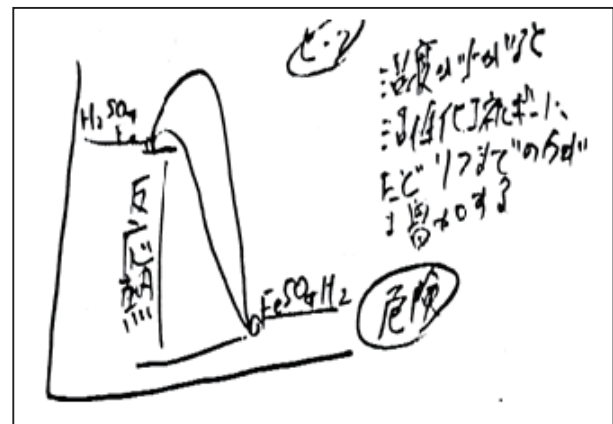


図17 硫酸と鉄粉の温度を変えた実験の考察

最後に、教師は化学反応式と関連付けを促すことで、生徒は図18のようにワークシートに化学反応式を記述した。

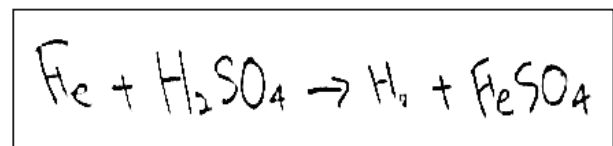


図18 硫酸と鉄粉の化学反応式

以上の学習段階を表象ネットワークモデルの視点から捉えれば、図19のように、反応経路とエネルギーの映像的モデルや化学反応式による記号的モデルが媒介することで、3つのレベルの表象の相互連関を促進させたと考えられる。

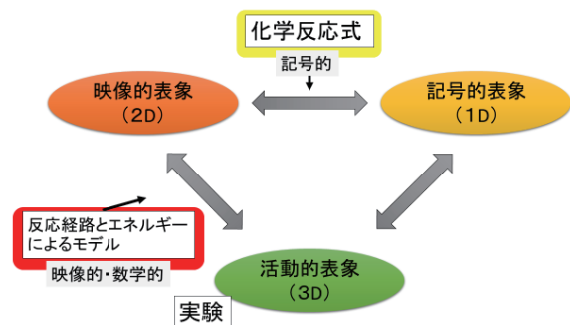


図19 3つのレベルの表象の相互連関

このようにして、反応速度式から反応速度を捉える2つ目の概念プロセスモデルを構築していったと考えられる。以上より、生徒は、単位時間あたりの濃度変化及び

反応速度式から反応速度を捉える，2つの概念プロセスモデルの構築を達成したのである。

## 6. 本研究のまとめ

本研究では，高等学校化学の学習における多種多様なモデルと，それらのモデルが表象のネットワーク構築に及ぼす影響について検討した。

授業実践を通じて，生徒は，反応速度について，映像的モデルや記号的モデルなど，多様なモデル表現を通じて科学概念を構築した。それは大別して，2つの概念プロセスモデルの構築につながった。第1次では，単位時間あたりの物質の濃度の変化分から反応速度を捉える概念プロセスモデルを構築した。第2次では，反応速度式から反応速度を捉える概念プロセスモデルを構築した。これら2種類の概念プロセスモデルを包括することで，反応速度に関する理論モデルが構築された。図20に，本学習過程において機能した各種モデルの関連を整理し，模式化した。

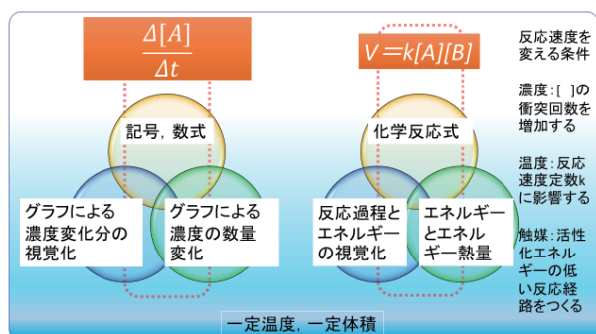


図20 各種モデルの模式図

以上から，各種モデルの構築と表象ネットワークの視点による分析の結果として以下の諸点にまとめることができる。

(1) 各種モデルは，表象移行に影響する要因となることが示唆された。

(2) 映像的モデル，数学的モデル，そして記号的モデルの有する意味内容のつながりを示すことで表象の移行が促進されることが示唆された。

(3) 「化学反応の速さ」の概念に対して，2つの概念プロセスモデルを構築した。そこでは，記号的モデル，数学的モデル，映像的モデルを複合的に構築していく必要があった。

これらの視点は高等学校化学の授業デザインをするにあたって有益な視点になると考えられる。この視点を基礎として，今後はモデルを用いた高等学校化学の教授方略の視点についてより詳細に検討していきたいと考えている。

## 引用・参考文献

- 1) 和田一郎・森本信也：「子どもの科学概念構築における表象の変換過程の分析とその教授論的展開に関する研究—高等学校 化学『化学反応と熱』の単元を事例に一」，理科教育学研究，Vol.51，No.1，pp.117-127，2010
- 2) 国立教育政策研究所：「平成27年度全国学力・学習状況調査 報告書 中学校 理科」，<http://www.nier.go.jp/15chousakekkahoukoku/report/data/msci.pdf>，2015
- 3) 和田一郎・森本信也：「電子黒板の特性を利用した理科学習の内化と外化に関する研究—高等学校 化学『反応速度』の単元を事例に一」，理科教育学研究，Vol.48，No.3，pp.85-96，2008
- 4) Christina V. Schwarz, Brian J. Reiser, Elizabeth A. Davis, Lisa Kenyon, Andres Achér, David Fortus, Yael Shwartz, Barbara Hug, Joe Krajcik: Developing a Learning Progression for Scientific Modeling: Making Scientific Modeling Accessible and Meaningful for Learners, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 46, No.6, pp.632-654, 2009
- 5) John K. Gilbert, Carolyn J. Boulter: Learning Science Through Models and Modelling, *International Handbook of Science Education*, pp.53-57, Kluwer Academic Publishers, 1998
- 6) Allan G. Harrison, David F. Treagust: Learning about Atoms, Molecules, and Chemical Bonds: A Case Study of Multiple-Model Use in Grade 11 Chemistry, *Science Education*, Vol.84, No.3, pp.352-381, 2000
- 7) 広岡亮蔵：『ブルーナー研究』，pp.68-79，明治図書出版株式会社，1976