

高等学校化学におけるモデルと表象の関連 —教科書分析による一考察—

Interrelationship between to Generate Scientific Models and Representation in High School Chemistry Education : A Consideration in Analysis of Textbooks

○一ノ瀬友輝^A, 和田一郎^B, 森本信也^B

ICHINOSE, Yuki, WADA, Ichiro, MORIMOTO, Shinnya

横浜国立大学大学院教育学研究科^A, 横浜国立大学^B

Graduate School of Education, Yokohama National University, Yokohama National University

[要約] 高等学校化学は、様々なモデルと記号を対応づけた非常に抽象的な学習内容になっており、生徒にとって本質的な理解を伴った科学概念構築を達成することは容易ではない。

本研究では、高等学校化学の教科書について、和田・森本が提唱した表象ネットワークモデルを援用し、教科書に記載されている各種のモデルと表象の移行との関連について分析した。

結果として、教科書に記載されているモデルは、各表象レベルの相互関連に影響を与え、記載されるモデルの種類や順序によって、表象変換過程の差異が生じることが明らかとなった。

[キーワード] 高等学校化学, モデル, 表象, 教科書分析

1. はじめに

高等学校理科においては、微視的・巨視的に現象を捉え、科学概念を構築していかなければならない。例えば化学に着目すると、現行の高等学校学習指導要領では、化学の概念や原理・法則といった抽象化された事項も、単に記憶するだけではなく、常に物質の示す具体的なふるまいと結び付けて理解させることが求められている。すなわち、科学的に探究する過程において、様々な表象 (representation) が相互関連を成すことで科学概念を構築していくことになる。

例えば、和田らは、高等学校化学の学習では、観察結果に対するイメージ、あるいは分子モデルと化学反応式との対応といったように、様々なレベルの表象の相互変換に関わる能力が強く要求され、それが科学概念構築に極めて重要な役割を果たすことを指摘している (和田ら, 2009)。特に化学においては、微視的に捉えていく中で、化学反応式での表現がなされる段階では非常に抽象化された学習を行うことになる。そのため、様々なレベルでの表象を関連づけた上での理解が重要となるのである。

これに関して、和田らは、表象ネットワークモデル (図1) を提示し、それぞれの表象の相互関連の様相を示した (和田ら, 2010)。

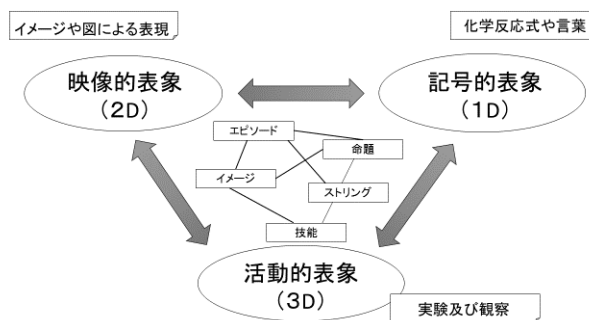


図1 表象ネットワークモデル

具体的にはこうである。表象は大別すると、活動的表象、映像的表象、記号的表象の3つに分類される。活動的表象とは、具体的な行動を通じた事象理解 (3D)、映像的表象とは、絵やイメージ等を通じた事象理解 (2D)、記号的表象とは、記号や言葉を通じた事象理解 (1D) である。化学の学習においては、それぞれ、観察・実験 (3D)、イメージや図による表象 (2D)、化学反応式や言葉での事象理解に該当するといえる。これらが相

互に対応づき、具体から抽象へと表象が結びつくとき、理解の深化が図られるのである。

また、Shawn, M.G.らが指摘するように、生徒が有意味に科学の概念を学習するには、教師は、生徒が様々な概念を関係づけて学習できるように支援することが重要となる。孤立した概念のランダムリストではなく、その関連する情報がネットワークとして組織化されるように学習されるべきである (Shawn, M.G.ら, 1993)。

そのネットワークを構築するためには、教師による、それらの関連付けを促す教授やその結びつきの強化が促進される支援が重要である。

授業を進めていく中で、教師と生徒との媒介となる一つの要素として教科書があげられる。生徒が学習を進める上で基本となる教科書を分析することで、表象の統合を促す教授のための視点を見出すことができると考えられる。

そこで、本研究では、高等学校化学の教科書(4社)を分析し、表象のネットワーク構築に及ぼす影響を検討する。

2. 分析の視点

まず、上述したような様々なレベルでの表象の一形態としてモデルがある。Harrison&Treagustは、特に化学における類推モデルの種類は、スケールモデル (scale models), 分子模型(molecular

models), 映像的モデル(iconic models), 記号的モデル (symbolic models), 数学的モデル (mathematical models), 理論的モデル (theoretical models), 概念プロセスモデル (concept-process models)に分類できるとした (Harrison&Treagust, 2000)。

さらに、Schwarzらは、モデリングを言語、数式、図などを用いて、科学的な現象を説明したり、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た (Schwarz et al., 2009)。すなわち、言語やグラフ、化学反応式などもモデルであり、それらの複合的表象を構築することがモデリングであるといえる。

以上を踏まえ、教科書に記載されている生成された科学的なモデルと、そのモデルが表象ネットワークの形成に及ぼす影響について考察していく。

3. 教科書分析

高等学校化学において、抽象性が高い学習内容である化学平衡の分野を事例に教科書分析を試みた。具体的には、化学平衡の法則を取り扱うまでを分析対象とした。4社の内容構成を表1に示す。

表1 4社の化学平衡に関わる内容構成

A社	B社	C社	D社
可逆反応と不可逆反応	可逆反応と不可逆反応	可逆反応と不可逆反応 化学反応式イメージ	可逆反応と不可逆反応
↓	↓	↓	↓
化学平衡 化学反応式反応速度式 グラフイメージ	化学平衡 化学反応式反応速度式 グラフ	化学平衡 反応速度式グラフ	化学平衡 化学反応式イメージグラフ
↓	↓	↓	↓
化学平衡の法則	化学平衡の法則 イメージ	化学平衡の法則	平衡の移動 実験
↓	↓	↓	↓
平衡の移動 実験	平衡の移動 実験	平衡の移動 実験	化学平衡の法則

3. 1 映像レベルと記号レベル間の表象変換

4社すべての教科書において、可逆反応と不可逆反応の説明から始まっていたが、観察、実験などの記載は見られなかった。すなわち、学習の初期段階では、活動的表象となる要素はなく、映像的表象と記号的表象との関連を図る中で、化学平衡の概念を捉えていくことになると考えられる。

可逆反応と不可逆反応の説明は、その後の学習内容である「正反応と逆反応の反応速度が実質的に等しくなること」を理解するための基盤となるものである。ここではC社のみ、この説明に付随して粒子による映像的モデルが示されていた(図2)。また、記号的モデルとして、 $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ の化学反応式も同時に記載されていた。

以上から、ここで教科書に示されたモデルは、化学平衡概念に先行して、正反応と逆反応の理解に関わり、表象ネットワークにおける映像的表象と記号的表象を融合させる機能を有すると考えられる(図3)。なお、ここでは反応速度概念が付加されていないため、動的な表象ではなく、静的な表象としての捉えに留まることが考えられる。

次の化学平衡の学習では、A社、B社には、記号的モデルとして、化学反応式 $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 、数学的、記号的モデルとして、正反応(HIの生成速度)の速度式 $v_1 = k_1 [H_2][I_2]$ および逆反応(HIの分解速度)の速度式 $v_2 = k_2 [HI]^2$ が示されていた。C社は、反応速度式のみが示されていた。しかし、D社は反応速度式の記述はなく、化学反応式のみが記載されていた。ただし、水素とヨウ素からヨウ化水素が生成し、ヨウ化水素の一部はヨウ素と水素に分解、つまり一定の物質量の割合で混合し

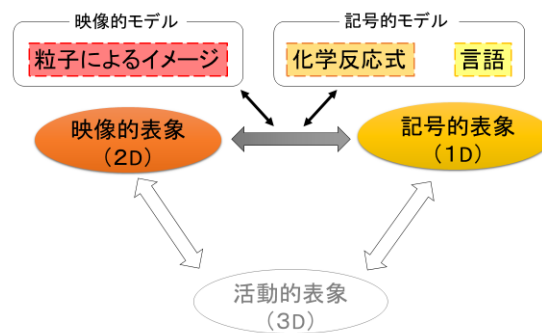


図3 映像的表象と記号的表象の往還

た状態となることが文章で補足されていた。これらのことから、A社、B社、C社は記号的モデルや数学的モデルの関連づけが深まる構成であると考えられる。

以上に引き続き、A社、B社、C社は、化学反応の速度が濃度に関係することを踏まえた上で、「ある時間が経過すると、見かけ上反応が停止しているように見える状態を化学平衡と呼ぶ」というように説明していた。C社に関しては、この段階でHIの生成速度の式とHIの分解速度の式が示された。これによって、図2に示された映像的モデルと反応速度式の数学的、記号的モデルの対応づけが深まることになると考えられる。D社は、反応速度式が示されないまま化学平衡の概念を扱っていた。

さらに、B社、C社は、経過時間と濃度のグラフ、経過時間と反応速度のグラフが示されていた(図4)。これは映像的モデルと数学的モデルの融合したモデルであるといえる。

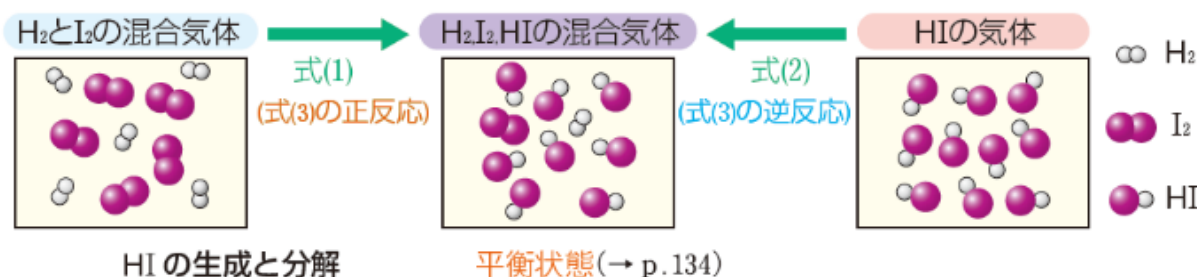


図2 反応の方向と化学平衡 (C社)

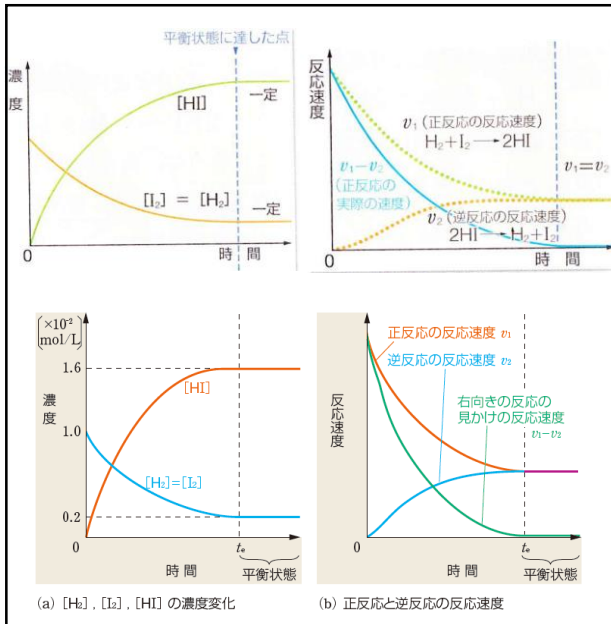


図4 B社(上), C社(下)のグラフ

このように、B社、C社は、反応速度の式を経過時間と濃度、経過時間と反応速度の両面からグラフによって捉えることで、記号的表象として捉えた反応速度式が具体化すると考えられる。

また、A社は、経過時間と濃度のグラフと経過時間と反応速度のグラフに加えて、粒子による映像的モデルが示されていた(図5)。

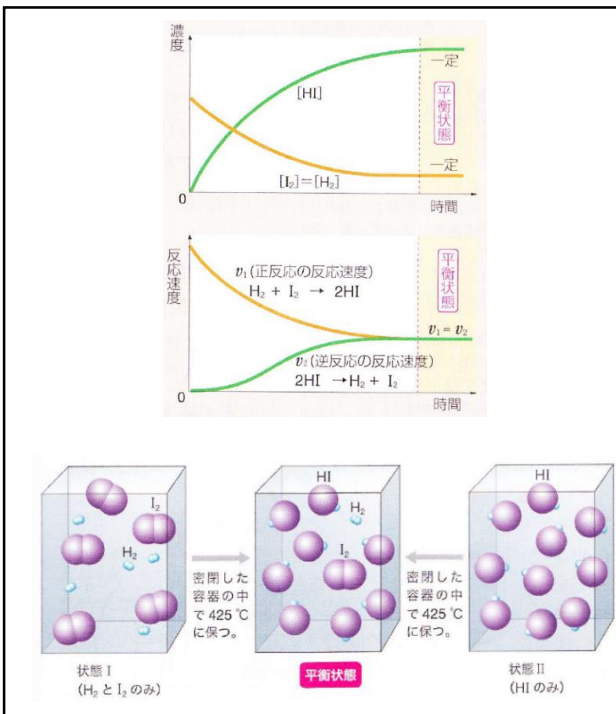


図5 化学平衡のグラフとイメージの表記(A社)

D社に関しては、 H_2 と I_2 、 HI それぞれに関する反応時間と物質量のグラフが示されており、それとともに粒子による映像的モデルが示されていた(図6)。その後、経過時間と反応速度のグラフが示される構成となっていた(図7)。

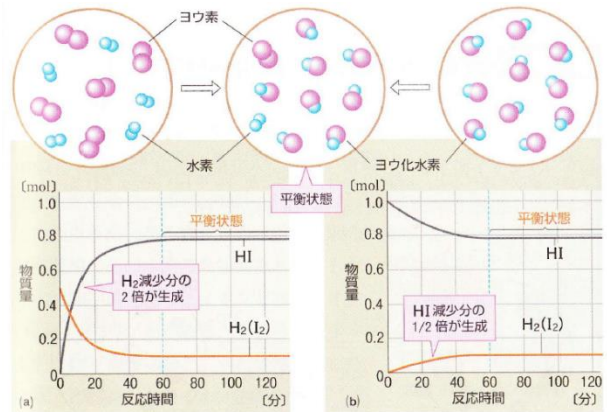


図6 化学平衡のグラフとイメージ(D社)

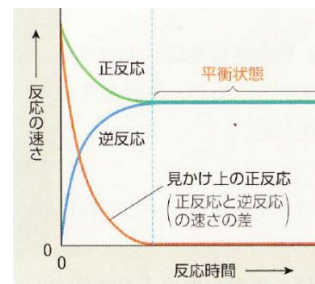


図7 化学平衡のグラフ(D社)

このように各社とも、これまでに映像的表象と記号的表象との間で、静的に捉えられてきたものが、グラフが示されることによって、動的に捉えることを可能にすると考えられる。つまり、ここでの映像的、数学的モデルは、事象を動的に捉える機能を有すると考えられ、動的な表象への移行を支援する重要なモデルであると考えられる。

また、各社の示すモデルの種類や順番性は異なっていた。この際C社は、先にイメージが示されており、映像的表象から記号的表象へと移り変わってきていることが考えられるため、再度グラフを媒介に映像的表象と対応づける教師の促しが必要になると考えられる。

A社は、グラフと粒子による映像的モデルによって、映像的表象が促されやすいと考えられる。

ここでの教師の支援としては、どのグラフが粒子による映像的モデルとどのように対応づいているのかを捉えさせる必要があると考えられる。グラフとイメージが同時に複数示されるため、正反応、逆反応、そしてそれらを種々の表象で複合的に捉えさせる過程が必要といえる。

D社に関しては、グラフと粒子による映像的モデルが同一の図上に示されていることで映像的表象の促しが強化されると考えられる。しかし、平衡状態では、一定の混合比になるという言葉による説明（記号的表象）との関連が薄い。また、反応速度の概念がないままこのグラフを捉えることになるため、ここでは、なぜ反応速度が示されるのかを明確にする支援が必要であると考えられる。さらに、D社は図6（2種）および図7の3種類のグラフがでてくることから、これらの対応づけは容易でないことが考えられる。これには、図6の左側の水素、ヨウ素についてのグラフと、図6の右側のヨウ化水素のグラフとを対応付ける必要があると考えられる。正反応のグラフと逆反応のグラフとを混同しないように示し、その上で図7の反応速度のグラフに移っていく必要があるであろう。

最終的には4社とも、反応速度が一定になったところが平衡状態であることが明記されており、正反応と逆反応の反応速度が一致しているところを目の当たりにすることで、言葉による化学平衡の説明（概念プロセスモデル）と関連づけることが可能になると考えられる。

総じて、各種のグラフが何を意味するグラフなのかを明らかにした上で、粒子による映像的モデルと関連づける過程が不可欠であると考えられる。これは、表象ネットワークにおいて、これらのモデルが、1D・2Dの結びつけを強化する媒介となっていることを意味しよう（図8）。このように、反応速度概念と化学平衡概念が独立せずに関連する科学概念として生徒に獲得されていく必要があると考えられる。

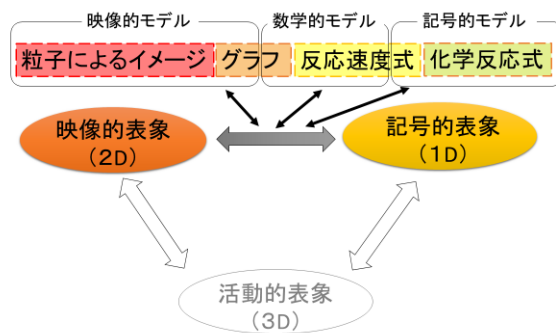


図8 モデルを媒介とする表象構築

最後に、A社、B社、C社は、化学平衡の法則として化学平衡の関係式 $([C]^c[D]^d/[A]^a[B]^b=K)$ の導出について扱っていた。D社は、濃度変化と平衡移動、圧力変化と平衡移動、温度変化と平衡移動、そしてルシャトリエの原理を経て、化学平衡の法則へと進んでいくこととなっていた。

A社、C社に関しては、反応速度が一定になることにより、反応速度式から化学平衡の関係式を導出していた。B社に関しては、平衡状態の映像的モデルが示された上で、化学平衡の関係式が導出されていた。ここでの粒子による映像的モデルは、図8でいう記号的表象から映像的表象へ移行を促進させる機能を有していると考えられる。これに際して、粒子による映像的モデルを用いた後、再度グラフに戻り、化学反応式や反応速度式と関連づいた上で、化学平衡の関係式の導出へと移っていく支援が必要になると考えられる。

D社は、平衡移動に関する実験の写真が織り交ぜられていた。これは写真が媒介となり、活動的表象への移行を促す機能を有していると考えられる。これを具体化するには、映像的表象を媒介とした活動的表象と記号的表象の連関を図る教師による支援が必要であると考えられる。

3. 2 活動レベルの表象との関連づけ

観察実験の写真が示されるのが、いずれの教科書も化学平衡の移動に入ってからであった。つまり、ここではじめて活動的な表象として事象を捉えることが可能となる。本研究では、化学平衡の

関係式を導くまでを分析したが、A 社、B 社、C 社については、活動的表象として捉える前に記号的表象へ到達することとなる。そのため、実験写真を媒介として映像的表象と対応付けること、さらには粒子による映像的モデルやグラフ、反応速度式によって化学反応式と対応づけるような支援が必要になると考えられる (図 9)。

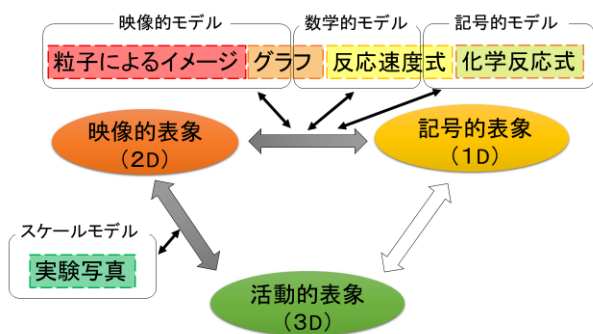


図 9 3つのレベルの表象の相互連関

4. おわりに

高等学校での学習内容は非常に細分化していることから科学概念を獲得するには、複合的表象を精緻化することが重要である。表象ネットワークの視点に戻れば、イメージやグラフ、記号、化学反応式、言語などの表象を総合的に捉えて概念を構築していく必要がある。それは、化学平衡の関係式 ($[C]^c[D]^d/[A]^a[B]^b=K$) が、反応物と生成物の積をとる形になり、係数乗をする原理までを関連づいた理解の様相である。それには、以上に述べてきたような表象の相互連関の視点を軸とした教師や他者の介在が不可欠であると考えられる。

引用及び参考文献

Harrison&Treagust : Learning about Atoms, Molecules, and Chemical Bonds : A Case Study of Multiple-Model Use in Grade 11 Chemistry, Science Education, Vol84, Issue3, pp.352-381, 2000

井口洋夫・木下實ほか 14 名 : 化学, pp.123-126, 実教出版, 2015

文部科学省 : 高等学校学習指導要領解説理科編理数編, 実教出版, 2009

齋藤烈・藤嶋昭・山本隆一ほか 19 名 : 化学, pp133-135, 啓林館, 2012

Schwarz et al . : 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

Shawn, M.G. ら (稲垣成哲 訳) : 理科学習における構成主義的見解, 理科学習の心理学 子どもの見方と考え方をどう変容させるか, p.16, 東洋館出版社, 1993

竹内敬人ほか 17 名 : 新編化学, pp.100-102, 東京書籍, 2015

和田一郎, 森本信也 : 科学概念構築を目指す理科授業デザインの現代的課題 (9) —子どもの科学概念構築に関わる表象の視覚化とデジタル化—, 日本理科教育学会第 59 回全国大会論文集, p.153, 2009

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, Vol51, No.1, pp.117-127, 2010

山内薫ほか 18 名 : 化学, pp116-125, 第一学習社, 2015