

# 粒子モデルの科学的な操作の促進と物質概念の形成に関する研究

平野研究室 漆畑 文哉

## 【要約】

本研究は、視覚化された概念的道具である粒子モデルを思考において使用させる際に、アニメーション提示によってモデルの動的な表現操作を受容させ、その適用を促進させるような教授アプローチの開発と導入を通じて、学習者の現象解釈や物質概念の変容、および学習者の認識過程や学習環境などへの影響を総合的に分析・検討した。中学校理科や高等学校化学基礎のイオンに関わる学習単元の授業でイオンモデルのアニメーション提示を学習者に導入した結果、学習者は提示内容と同一文脈ではモデルの動的な表現操作ができたが、異文脈では困難であった。そこで、モデル表現操作の適用向上への効果を自他による反省の実施に期待して、模型にした物質の粒子モデルを操作しながら議論する協調的なグループ学習活動を小学校理科第4学年の物質の熱移動に関する授業へ導入して検証した。その結果、モデルの動的な表現操作の適用とグループ議論によって学習者の対流概念が科学的なものへ精緻化される方向にあることが見られたほか、さらに、密度変化や分子運動などアニメーションで提示された操作を越えたバリエーションの動的表現操作を使用した仮説生成の推論も行われたことなどから、学習者の内省的かつ創造的な科学的表現の獲得・適用が促されることが示唆された。

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景

化学領域の学習は、物質の属性や特徴、作用に関わる諸事象から抽象的な概念と包括的な理論体系を理解することにある。Ben-Zvi らによれば、科学者は現象を理解する際、物質の構造的側面、運動的側面、相互作用といったエネルギー的な側面に関与する概念を原子・イオン・電子といった物質の構成単位である個々の科学概念と関連づけ、粒子の挙動をモデル化して理解している<sup>1)</sup>。一方で、理科の学習者は物質概念についてモデルや化学式といった複数の表現形式を用いていながら、それらを現象と関連づけることが困難であることや、彼らのもつ既存概念が断片的性質を持つことが Kozma らなどにより指摘されている<sup>2)</sup>。学習者の既存概念の断片的性質を考慮した場合、モデルとその知的操作の習得を通じて、彼らが現象についての知識や表現方法の知識を統合する過程を用意することが重要になる。これに関連して内ノ倉は、科学的探究の方法としてモデルを活用した習得の重要性を指摘している<sup>3)</sup>。

思考を媒介する概念的道具として粒子モデルを捉えたとき、学習者には科学者の認識と同様に粒

子モデルを物質概念のエネルギー的側面に基づいて知的操作し、現象を説明できるようになることが求められる。このような知的操作を学習者が習得するためには、粒子モデルを動的に表現操作するための手続き的知識の獲得が必要となる。Williamson らにより、アニメーションを用いて粒子モデルの動的操作を視覚化して提示する教授アプローチが試行された<sup>4)</sup>ほか、近年ではアニメーションを足場がけにした知識統合の実現についての検討が行われている。例えば、Zhang らは化学変化の学習において、アニメーション提示のみの場合に比べ、提示後に描画を伴う説明活動がある場合の方が、粒子モデル表現を化学式などの他の表現や、エネルギー概念と統合させて現象を説明できることを示唆している<sup>5)</sup>。ただし、モデル提示直後の学習者は特殊な解釈を用いていても、自身が理解できたと認識する傾向も指摘されている。また Chang らは視覚化提示の後に批評的活動を設定することで、理解がさらに深まることも示唆している<sup>6)</sup>。モデルに対する学習者の認識や学習を取り巻く環境がどのように物質概念の形成に影響を与えるのかという点について、実際の授業実践から統合的に検討する必要があるが、これらを

検討した研究は見られない。

## (2) 研究の目的

ところで、日本の理科授業では観察・実験を中心とする授業が日常的に行われている。例えば、イオンに関わる化学変化や物質を介する熱移動の実践では、イオンの移動や温度変化を視覚化する実験教材は多く開発されてきた。しかし、モデルと関連づけた現象解釈を促す指導が十分に検討されておらず、学習者の概念形成の困難も指摘されている。このような指導実践上の課題がある単元を取り上げ、粒子モデルによる動的表現操作を促す教授アプローチを検討することは教授・学習改善の示唆を得る上で意義があると考えられる。

以上を踏まえ、本研究は思考に用いる概念的道具としての粒子モデルについて、アニメーションによる視覚化を足場がけとしてモデルの動的な表現操作の獲得・適用を促進する教授アプローチによる教育効果を、学習者の現象解釈や物質概念形成の変容および学習者の認識過程や学習環境への影響の面から総合的に検討することにより、物質概念の形成を促す教授・学習への示唆を得ることを目的とする。

## 2. アニメーション提示による粒子モデルの受容に関する検討

### (1) 電気分解のモデル提示による表現の適用(中学校3年理科「化学変化とイオン」)

まず、アニメーションによるモデルの動的表現操作によってイオンモデルの挙動を提示することで、学習者がいかにイオンや電子の概念を受容・拡張し、動的な化学変化を解釈して説明できるかを検討した。調査は中3「化学変化とイオン」の電気分解に関する授業2時間を取り上げ、私立中学校3年1学級41名を対象とした。

第1時では塩化銅水溶液の電気分解の理論的側面について授業者がモデル図、反応式、文章を用いて口頭と板書で説明し、アニメーションによるモデルの動的表現操作と演示実験を提示して塩素と銅の生成を学習者に観察させた。次に、第2時で授業者が塩酸の電離について電離式を板書した後、モデル図、文章、反応式を区別した塩酸の電気分解の説明を学習者に求めた。この時、前時で見せたモデル表現を説明作成の途中で提示した。

第2時の授業におけるアニメーション提示前、提示後、授業者の説明および演示実験を行った授業後においてワークシートに記述されたモデル図に含まれる説明要素を集計し、 $\chi^2$ 検定で分析した。文章と反応式の記述の変容についてもモデルと比較して検討した。また、アニメーション提示後における学習者の電気分解に関する自身の理解への自覚についてコメントを記述させた。

モデル図を分析した結果、アニメーション提示前と比較し、塩素と水素の分子モデル表現の増加に有意な差が認められ(塩素分子: 19名→30名,  $\chi^2(1)=5.07, p<.05$ ; 水素分子: 13名→23名,  $\chi^2(1)=4.01, p<.05$ )、電気分解の生成物についての分子構造を関連づけてモデル図や記述を説明に用いた学習者が多く見られた。一方、電気分解を説明する上で重要なイオンの移動(19名→24名)や電子の移動(22名→24名)をモデル図に取り入れて電気分解の過程を説明する学習者はアニメーション提示後もあまり増加しなかった。したがって、学習者のアニメーションに対する選択的注意が概念的に重要なイオンや電子に向けられなかったものと考えられる。また、アニメーション提示直後のコメントでは、反応式記述の困難性(19名)や文章説明の困難性(14名)を挙げた者が多いことから、学習者はアニメーションの提示内容は大まかに認知できても、イオンや電子のモデルの詳細な挙動や量的関係については表現できるまでの認識状態になく、文章や反応式による記述に困難を感じていたと考えられる。また、「全部分かったつもりでいた」(学習者C21)といった記述も16名見られ、アニメーション視聴の際に電気分解を理解できたと自覚されるといった浅い思い込みが内省を通じて現れるという特徴も見られた。

### (2) 中和反応のモデル提示と適用の反復によるイオン概念の変容(化学基礎「酸・塩基と中和」)

先述の課題を踏まえ、アニメーションによるモデルの動的表現操作の提示と、現象解釈との説明を繰り返し行い、モデル適用の機会を増やした場合に学習者がモデルの動的な表現操作に基づく解釈が可能になるかを検討した。調査は高等学校化学基礎「酸・塩基と中和」における授業を取り上げ、私立高等学校2年1学級34名を対象とした。

授業構成を表1に示す。この授業では<実験1>から<実験4>までの各時点において描画および文章によって現象解釈を記述させ、その後、アニメーションによるモデルの動的表現操作「電解質の性質 (M1)」「塩酸と水酸化ナトリウムの中和 (M2)」（図1）「硫酸と水酸化バリウムの中和 (M3)」を提示し、新たにモデル図を書いて学習者自身の記述と比較させた。本調査では各実験の考察に対応する描画1～4をI群（現象的説明群）、II群（前粒子論的説明群）、III群（擬似粒子論的説明群）、IV群（粒子論的説明群）に分類して人数を集計し、 $\chi^2$ 検定で分布の差を分析した。また、この実験に対応する学習者の記述1～4およびアニメーション提示後にあたる記述2'と記述3'を質的に分析し、モデルの動的表現操作を適用する際の学習者の認識過程を質的に分析した。

時限	学習内容 (全16時間)
1	身近な水溶液の性質を調べる
2	M1を視聴してイオンの定義と移動を確認する <実験1>リトマス紙による酸塩基の電気泳動
3～4	M1を視聴し、酸・塩基と中和の定義を確認する <実験2>HClとNaOHの中和 M2を視聴して解釈を振り返る
5～6	<実験3>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> とBa(OH) <sub>2</sub> の中和 M3を視聴して解釈を振り返る
7～9	電離度と水素イオン濃度、pHについて説明を聞く
10～11	<実験4>CH <sub>3</sub> COOHとNaOHの中和
12～16	中和滴定を行い、単元のまとめを行う

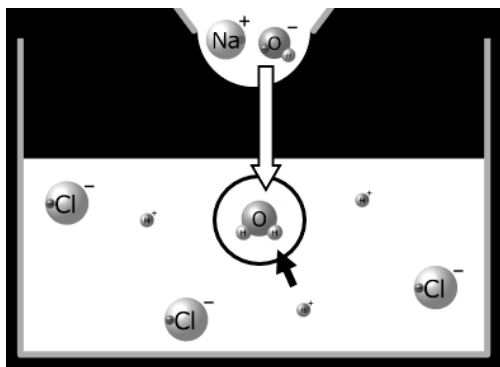


図1 アニメーション (M2) ※矢印は著者の追記

事前・事後テストおよび授業の描画1～4における学習者の各描画の人数を $\chi^2$ 検定し、さらに有意差が認められた時点の各人数をRyan法による多重比較を行った結果、描画4と事後テストでIV群に有意な分布の差が認められた（描画4： $\chi^2_{(3)}=38.29, p<.01$ ; 事後： $\chi^2_{(3)}=17.55, p<.01$ ）こと

から、授業全体を通して学習者はイオンモデルを適用した中和概念の形成が促されたと考えられる。しかし、継続的に調査できた28名におけるイオンモデルの動的表現操作の適用人数とその変容（図2）を分析すると、28名中27名は描画1～4のいずれかでモデルの表現操作適用の変容が起きない、もしくは既有概念に基づくモデルへ逆戻りする現象が見られた。その現象は個人差があるが、特に描画1と描画2の間で顕著に見られた。

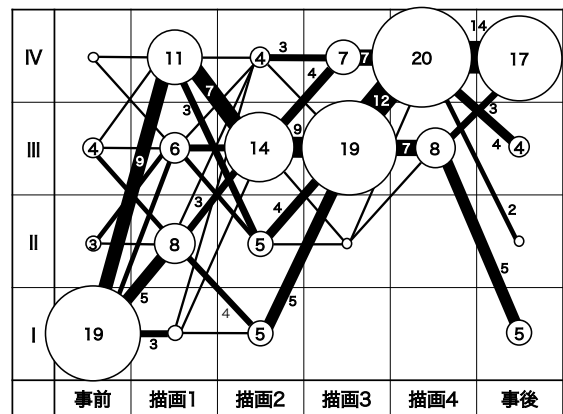


図2 イオンモデルの動的表現操作適用の変容 (N=28)

M1の視聴後、塩酸と水酸化ナトリウムを用いたリトマス紙による電気泳動をモデルの動的表現操作をしたIV群の学習者は11名おり、なかには実験では直接観察できない塩化物イオンやナトリウムイオンの移動を表現操作している者も見られた。しかし、同じ試薬を用いた中和を記述した描画2において11名中7名がIII群に、3名がII群に後退した。記述2に着目すると「酸性に塩基を混ぜると中性になるとわかった」(学習者C19)のように、現象のみ着目した記述が見られる。しかしM2視聴後の記述2'では「H<sup>+</sup>の数とOH<sup>-</sup>の数が同じになり、あまりなくH<sub>2</sub>Oになったとき(中略)過不足なく中和する」(学習者C19)のように、モデルによる認識に基づく記述が見られた。また、<実験3>の考察後M3を見た際の記述3'では「前回粒子モデルを書くとき、粒子の数が合わなかったりしたが、これで理解できるようになりました」(学習者C12)のように、提示モデルの表現（描画3'）と前に自身が用いたモデル表現（描画3）とを比較しながら差異を自覚し、モデルの表現操作と文章や反応式との関連づけが見られた。

以上の結果を踏まえると、アニメーションによるモデルの動的な表現操作の提示直後における、学習者のモデル表現操作適用は提示内容と同じ文脈に依存しており、異なる文脈に対しては適用が極めて困難であることが考えられる。しかし、モデルの動的な表現操作の適用における文脈依存性が学習者の内省により自覚されるとき、その認知的葛藤から概念変容を促進させていくと考えられる。認知的葛藤の必要性は Posner にも述べている<sup>7)</sup>が、本研究のアプローチで見られた認知的葛藤はメタ認知的モニタリングにより提示モデルと自己の認識との差異が自覚されるほか、異なる文脈においてもモデルに基づく解釈に関してコントロールがはたらくためではないかと予見される。そして、モデルの動的な表現操作に基づいて、学習者が自覚的に現象を解釈するとき、文章や表現との統合が促進される。しかし、内省のタイミングは学習者によって異なっており、モデルの動的表現操作の受容や広範な適用をどのような活動や方法を使って促進することで学習者のメタ認知的モニタリングを促すかという点に、課題が残った。

### 3. 粒子モデルに基づいた創造的説明活動に関する検討

#### (1) 熱移動の学習内容における概念構成の現状

先述の課題の改善策として、具体的な操作物として粒子モデルの模型を導入し、さらに学習者集団による協調的な学習環境による創造的説明活動を導入した場合における学習者の概念形成について、小4「物の温まり方」を取り上げて検討した。

学習者に操作させる粒子モデル模型をデザインするにあたり、まず、過去の学習指導要領および教科書の変遷を踏まえてこの単元における概念構成の現状を分析した。その結果、この単元では物質概念の構造的側面および熱概念の形骸化が見られ、これに関連して対流に関する概念理解が変質するという2つの課題が示唆された。

この単元は昭和33年改訂で創設された、熱伝導や対流、熱放射といった熱概念全般を扱う単元「熱の移り方」をルーツにもち、昭和43年以降に物質概念との統合が見られる。しかし、平成元年の改訂において熱概念が削除され、平成20年改訂ではそれまで統合されていた「物の温度と体積」

が教科書上で分裂し、事実上中核概念である熱概念と物質概念のどちらも形骸化している。また、熱と物質の移動が同時に関与する対流現象の扱いに着目すると、水の対流現象を示すために使用する教材は、サーモインクなどによって温度変化の視覚化は可能であるものの、物質の構造変化の視覚化は容易ではなく、図やイラストでも熱と物質の移動を区別した説明が困難なため、加熱による上昇流の後に関する記述が削除され、熱と物質に関係する概念の理解が変質していると考えられる。

#### (2) 創造的説明活動による対流概念の精緻化(小学校4年理科「物の温まり方」)

先述の示唆をもとに、熱と物質の異なる側面を色と形状で構造的に区別して表現することが可能な模型をデザインした。粒子モデルに基づく模型は直径5cmの円形、表裏が青と赤の2色の模型を厚紙で作成した(図3)。これを描画された容器内に複数個置いて操作することで、熱移動や物質構造の変化といった概念的表現を可能にした。さらに、模型の動的な表現操作を促進するアニメーションを作成した。アニメーションはストップモーションによる撮影で、金属・水・空気の温まり方について6~23秒の動画を計5種類用意した。このアニメーションを学習者に提示して、モデルに含まれる科学概念と模型操作を対応づけた(表2)。この模型とアニメーションをグループによる模型

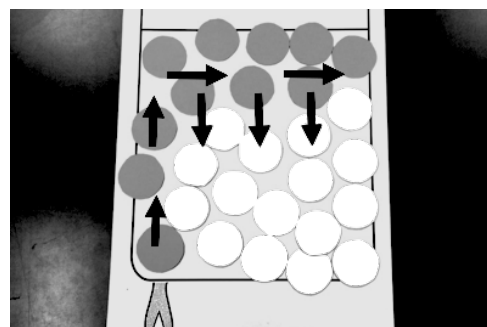


図3 模型による対流アニメーション ※矢印は著者の追記

表2 科学概念と模型操作の対応づけ

科学概念 (宣言的知識)	物質のもっている熱 熱源 熱の伝わりやすさ	赤色の模型 最初に模型が赤色になる場所 赤色の隣に青色の模型があっても色は変わらない様子(熱は伝わりにくい)
	物質の構造	模型は不規則に並び、模型を動かせる程度の隙間が空いている様子
表現方法 (手続き的知識)	熱の移り方 物質構造の変化	全体が青色から赤色へ変化する様子 熱せられたところから上に動き、全体の構造が変化する様子

操作に基づく説明活動と共に導入した学習環境による授業を実施し、特に対流現象に関する学習者の概念形成に焦点を当て、学習者の解釈の変容および説明活動における学習者の模型操作の動作および発話を分析した。調査は公立小学校4年1学級27名(4~5名を1班とするA~F班の6班編成)を対象とした。授業は全12時間で実施し、このうち、第5時においてサーモインクを用いた水の対流実験(予想・考察)を行い、第6時でまとめを行い、第7時で学習者に模型と台紙を配布し、模型操作による現象解釈による説明を試みた後、アニメーションの提示によって科学概念とモデルの動的表現操作の対応づけを行った。さらに、第8時でおがくずによる加熱時における水の移動について観察を行った後、第10~12時において班ごとに追及的な実験活動を行い、模型操作に基づく創造的説明活動を行った。

対流の解釈の変容は事前・事後テストおよび授業の予想・考察・まとめの各時点における学習者の描画と文章による現象解釈を分析対象とし、水準II(対流モデル)、水準I(上昇流の後の記述に誤りがあるモデル(回転モデル))、水準0(それ以外のモデル)に分類・集計し、 $\chi^2$ 検定とRyan法による多重比較を用いて分布の差を分析した。また、アニメーション提示前後における各班の説明活動はビデオ録画し、動作と発話をプロトコルに起こし、解釈内容を質的に分析した。

対流の解釈変容(図4)は、実験活動の考察時点で水準IIの解釈をした者は8名であり、まとめ時点においても水準0の者と拮抗し、検定も有意差が認められなかった(まとめ時点:  $\chi^2_{(2)} = 4.223$ ,

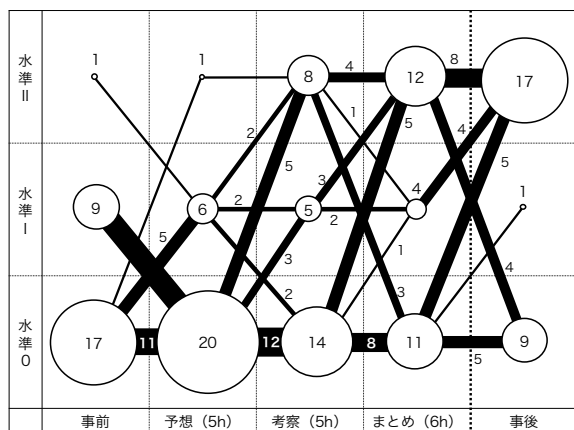


図4 水の対流についての解釈の変容 (N=27)

n.s.)。しかし、事後テストにおいては水準IIにおいて分布に有意な差が認められた ( $\chi^2_{(2)} = 14.22$ ,  $p < .01$ )。したがって、実験活動の後に行われた説明活動によって学習者の解釈は向上し、対流の概念形成に対して有効であったと考えられる。

まとめ時点で水準0であり、事後において水準IIに到達した5名のうち4名は実験活動において一貫して水準0であり、5名とも説明活動において模型操作を行っていた。また、この5名の描画を分析すると、水準0の記述でも熱源から水面全体へ水が上昇するという解釈を用いていたことから、説明活動を加えることによって回転モデルや上昇型モデルといった学習者の断片的な認識から形成された既有概念が変容してより精緻化され、概念形成を促進させたと考えられる。

また、アニメーション提示前後における各班の模型操作を分析したところ、提示前で模型による説明が可能だった班はE班とF班の2班のみであり、両班とも提示前で説明させた試験管内の水の温まり方について、物質の構造変化(流動)を考慮せず、熱源から試験管を伝って上昇し、水面でUターンして熱が伝わる様子を表したことから、両班とも対流を熱の回転として捉え、熱源がもたらす水の上昇流が熱の移動を媒介するといった関係を考慮していなかったと考えられる。

アニメーションの提示後に行われた追及活動では、すべての班がアニメーションで示されたモデルの表現操作によって現象を解釈することが可能になった。E班とF班は空気の対流を実験によって追及したが、両班ともアニメーションで提示した動的な模型操作のバリエーションを越えた、新たな動的表現操作の表出が見られた。E班は線香の煙を充満させたビーカー内の空気の加熱によつ

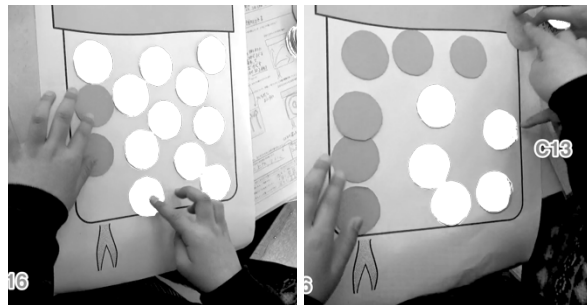


図5 模型操作による表現の様子

て煙の動きを空気の対流と関連づけた。このときビーカーの蓋から煙が漏れて上昇するという現象から模型をビーカーから出る表現操作を加え(図5)、「空気は全部出て行きました」(学習者 C27)と発言した。そこで授業者が「(ビーカーの)中はどうなったんですか?」と訊ねると、「空気はあるけど、あったかなくなった」と返答している。E班は空気の体積膨張(密度低下)と空気上昇を発話上では関連づけておらず概念理解を伴っているとは考え難いが、モデルの動的表現操作による概念的表現を用いて創造的な説明が行われた。

また、F班は紙で蓋をした丸底水槽を逆さにして線香の煙を注入し温められた空気が上昇した後の様子を観察した。この実験には熱源がないが、当初F班は空気の対流後に熱伝導のように水槽内の空気全てが温まると解釈したが、学習者 C20の「ぬるかった」という発言から模型操作が修正され、空気の一部で熱伝導が起こり、赤色と青色の混合状態で模型を動かし続ける操作を行った。本調査で用いたモデルは本来分子の運動エネルギーである熱を色で区別しているため、提示モデルの動的表現操作では熱平衡を表現できない。F班は現象の知識とモデルの表現操作を関連づけ、分子運動と同等の動的な解釈を用いることにより、新たな動的表現操作による仮説モデルを生成して推論を行ったと考えられる。

#### 4. 考察

本研究の指摘として、第一に、アニメーションによる粒子モデルの動的な表現操作の獲得の有効性について概念獲得と認識過程の側面から分析したところ、アニメーションによるモデル操作の受容と適用には文脈依存性があった。また、学習者自身の認識とモデル操作との違いがメタ認知的活動によって自覚されるときに認知的葛藤が起こり、概念の変容が促進されることが示唆され、さらに異文脈へもモデル適用を試みるなどのコントロールがはたらくものと考えられる。

第二に、モデル表現操作の受容・適用を強く促進するために、モデルを具体的な操作物に置き換え、学習者集団での協調的な説明活動を導入したところ、科学概念に向けて精緻化が進められただけでなく、提示した表現操作を越えた新たな動的

表現操作を創作するような、仮説生成の推論が促されたことが示唆された。

日本の理科授業では観察・実験を中心とした授業が日常的に行われている。よって、学習者にアニメーションによる粒子モデルの動的な表現操作の提示や、表現操作を促す道具、観察・実験で視覚化された現象を協調的に解釈する説明活動を与えて、粒子モデルに基づく演繹的思考や新たな仮説生成による創造的思考により他の現象知識や表現形式の知識との統合をしていくような活動を新たに理科授業へ導入していくことが求められる。その際には、学習者が粒子モデルと自身の認識に基づくモデルとの差異について、メタ認知的モニタリングによって自覚・内省されたかを授業者は形式的に評価して指導に活かすとともに、学習者自身も異文脈ではモデル表現操作をコントロールし最適化しながら現象を解釈していくことを意識しながら自身の学びを見直すことが必要である。

本研究では学習者間や授業者との社会的相互作用や、文章記述や物質の量的関係などとの知識統合を確認していないことから、方法などを十分に検討して調査を進めることを今後の課題としたい。

#### 【引用・参考文献】

- 1) Ben-Zvi, R., Eylon, B., & Silberstein, J., Students' visualization of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, Vol.24, 1987, pp.117-120.
- 2) Kozma, R. B., & Russell, J., Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, Vol.34, No.9, 1997, pp.949-968.
- 3) 内ノ倉真吾「アナロジーによる理科教授法の開発とその展開：構成主義的学習論の興隆以降に着目して」『理科教育学研究』Vol.50, No.3, 2010, pp.27-41.
- 4) Williamson, V. M., & Abraham, M. R., The effects of computer animation on the particulate mental models of college chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, Vol.32, No.5, 1995, pp.521-534.
- 5) Zhang, Z. H., & Linn, M. C., Can generating representations enhance learning with dynamic visualizations? *Journal of Research in Science Teaching*, Vol.48, No.10, 2011, pp.1177-1198.
- 6) Chang, H.-Y., & Linn, M. C., Scaffolding learning from molecular visualizations. *Journal of Research in Science Teaching*, Vol.50, No.7, 2013, pp.858-886.
- 7) Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A., Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, Vol.66, No.2, 1982, pp.211-227.