

## 理科における能動的な概念構築の実態とそれを促す教授方略に関する研究

教育デザインコース 理科領域  
佐野 菜実  
東京学芸大学附属小金井中学校  
宮村 連理  
教育学研究科  
和田 一郎

### 1. 問題の所在と研究の目的

中央教育審議会（2016）の次期学習指導要領等の理念とその実現に向けた方策を示した答申において、各教科等において習得する知識や技能は、「個別の事実的な知識のみを指すものではなく、それらが相互に関連付けられ、さらに社会の中で生きて働く知識となるものを含むものである」と示された。さらに、「新しい知識が、既に持っている知識や経験と結び付けられる」ことにより、「自分なりに活用できるようになることが重要」であり、その学びの過程に教師が関わっていくことの必要性が指摘されている。一方で、平成27年度全国学力・学習状況調査の結果をまとめた国立教育政策研究所（2015）では、「自らの考えや他者の考えを検討して改善すること」に課題があると指摘された。例えば問題番号②（3）、湿った斜面に沿って上昇してできる雲の成因を説明した他者の考えを修正する問題では、子どもには「水蒸気が水滴に状態変化すること」、「水蒸気が冷やされること」の2つの観点を関連付けることが求められた。しかし誤答の類型とその反応率の分析から、空気の体積と気温の関係を理解できていない、雲が水滴（氷の粒）であると理解できていない、水の状態変化に関する知識を身に付けていない、提示された資料の情報からの読み取りができていない、といった傾向があることが明らかになった。これは、子どもが学習した知識を十分に自己のものとして活用できていない他、知識や資料といったものを根拠として考えを修正する説明活動に困難を抱えている実情があることを示している。

このことから、理科授業における子どもの考え方の変容過程を詳細に捉えるとともに、科学概念構築を促す教授の視点について検討する必要があると言える。

1点目の子どもの考え方の変容、すなわち概念変化（conceptual change）について、佐野ら（2017）は概念変化とメタ認知機能に着目し、子どもが自己の概念に気づき、表現し、他者の考えを有効に活用しながら概念

を多様に発展させていく過程を事例的分析により明らかにした。その他、深谷（2011）のように、メタ認知機能の促進を主眼に置いたものであるが、知識の関連付けの枠組みとして、SBF理論（知識工学に源流をもち、生物学・生態学の分野におけるシステム全体の働きを捉える枠組み。構成要素（Structure）、仕組み（Behavior）、機能（Function）の3つの観点で要素間の関係性・階層性を示すことができる）を適用した研究も行われている。このように、概念同士を結び付けたりその関係性を捉えたりするためには、さらにそれを促していくにはより一層、どのような知識・概念を結び付ける必要があるのか、という視点を持つことが必要であると考えられる。しかし、2点目の問題である、子どもの学びを捉えながら、既有知識等の複数の情報と関連付けを図り自己のものとして使える知識へ発展させることを促す教授の視点についてはいずれの研究でも十分検討できていない。

そこで本研究では、子どもの知識の多様な情報処理過程を捉える概念変化モデルと、スコットら（2011）の複数の知識・概念を関連付けていくための教授の視点の融合を図り、教授と学習の両面から事例的分析を行うことで、教師の支援の具体を抽出した。

### 2. 子どもの学びを捉える視点

#### —概念変化とメタ認知の関連—

概念変化については、学習者がもともと保持している知識・概念が、一連の学習の中でどのような変化の過程をたどり、発展していくのかといった視点から、今後も検討される必要があると考える。また、学校教育において教師やクラスメイトといった他者の存在は重要である。子どもは、他者からの影響を受けながら自己の考えの妥当性を吟味したり、更新したりしていると考えられるからである。

佐野ら（2017）は、学習者の考えの多様な変化の在り方と、他者からの影響を加味した視点を提起する、ター

バー (Taber, 2014) の概念変化モデルに着目した。ここでは、6つの段階から成る情報処理過程 (図1の①～⑥) とメタ認知 (metacognition) の活動成分を関連付けたモデルを提案している (図1)。

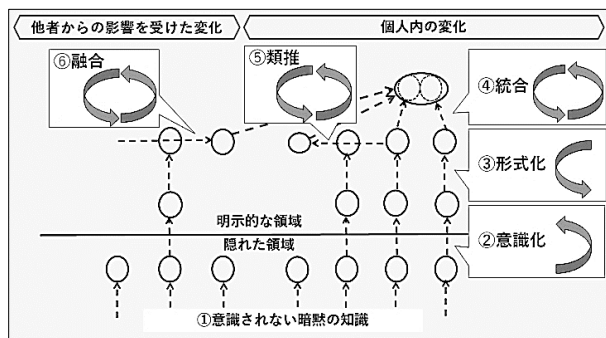


図1 概念変化とメタ認知の関連 (佐野ら, 2017)

三宮 (2008) によればメタ認知とは、認知についての認知を意味する。すなわち一般の認知活動を対象とした認知であり、学習者が自覚的、能動的に学習を進める際に欠かせない機能である。理科授業においては、例えば実験の結果を考察する場面で、仮説と結果を比べて自己の考えを評価し、よりよい説明に修正していく、といった活動が考えられる。ネルソンとナレンズ (Nelson, T. O. and Narens, L., 1990) はメタ認知の活動的側面であるメタ認知的活動を、「メタレベル (meta-level) が対象レベル (object-level) から情報を得る (図1における上向きのカーブ矢印)」「モニタリング (monitoring) と、「メタレベルが対象レベルを修正する (図1における下向きのカーブ矢印)」「コントロール (control) の二つの情報の流れによって説明した。以上の先行研究を基に、本研究のモデル (図1) は表1に示す6要素で構成される。

この視点により、他者と関わりながら学ぶ子どもの知識・概念が、モニタリングとコントロールのもと発展していく過程を総合的かつ詳細に捉えられると考えられる。

表1 図1の6つの要素

①	これまでの生活・学習経験に基づく暗黙の知識 (implicit knowledge), 概念
②	意識されない暗黙の知識・概念をモニタリングし、課題に合わせて選択することで、熟考可能なように意識する「意識化」
③	呼び出した知識・概念を他者に伝わるように操作・修正 (コントロール) する「形式化」
④	分散している知識・概念をモニタリングし、包括的枠組みに関連付ける (コントロールする)「統合」
⑤	既存の概念と獲得したい概念の共通性を見出し (モニタリングし)、それらに対応付けて新しい概念体系についての理解を構築する (コントロールする)「類推」
⑥	他者の表現と自己の既存の概念を比較・判断し (モニタリングし)、他者の考えを取り入れ自己の考えに修正を加える (コントロールする)「融合」

### 3. 複数の概念を結び付ける教授の視点

—Pedagogical link-making—

図1の④以降の要素は、複数の概念同士の結びつきについて説明するものである。特に「④統合」では、どのような内容の概念をどのような体系で結び付けていくのかによって、次なる学習場面での「①暗黙の知識」の質が変わってくることになると考えられる。すなわち、その結びつきが体系的で質の高いものであるほど、自己のものとして使える知識となっていくと言える。教師はこうした学びを促進するために、まずどのような知識とどのような知識を関連付けていくのかを意識し、授業をデザインしていく必要があると考えられる。このことに関して、スコットら (Scott, P., et al., 2011) が示した Pedagogical link-making (以下 PLM) は知識の有機的なリンクを形成させる教授の視点として有用である。知識の構築を支援する PLM の6つの形態を表2に示す。

表2 PLMの6つの要素

(1)	日常的な場面における説明と科学的な説明をリンクさせる
(2)	科学的な概念間をリンクさせる
(3)	科学的な説明と現実世界の事象とをリンクさせる
(4)	表現におけるモデル同士をリンクさせる
(5)	異なるスケールやレベルの説明の間を移行させる
(6)	類推によってリンクさせる

この6つの要素に関する指導は、順番に縛られることなく、教師がその時の子どもの学習内容・学習状況に応じて判断し、必要な要素を適宜講じていくことになると考えられる。

#### 4. 事例的分析

##### 4.1 分析方法

本研究では、図1と表2の視点に基づき、教師の意図的な教授と、それを受けて子どもが自らの概念を展覧させ、考えを結び付けていく実態を捉えた。

その際、子どものワークシートや発話内容、及び教師の発話内容から分析した。

##### 4.2 調査時期

2014年9月

##### 4.3 調査対象

東京都内の公立中学校第3学年 32名

##### 4.4 実施単元

「化学変化とイオン」酸・アルカリとイオン

##### 4.5 授業実践の概要

本授業実践は、粒子分野の単元「化学変化とイオン」の学習のうち、表3に示す「酸・アルカリとイオン」の学習、全4時間で実施した。

#### 5. 結果及び考察

本稿では実施した4時間のうち第1次の学習を分析対象として取り上げる。教師が設定した授業場面、ワークシート等の道具、発問、その他子どもへの働きかけを、表2に示したPLMの視点から、子どもの発話やワークシート等の記述を図1の概念変化の視点から考察する。

なお、事例の説明及び発話プロトコルの中で子どもをS、教師をTと表記した。また、教師や子どもが「水酸化ナトリウム」を「エヌエーオーエイチ」と発音したり「NaOH」と記述したりした場合、並びに筆者がその部分を抜き出したり要約したりした文章については、化学式で記述した。「水酸化物イオン」等もそれに準じて記述した。

##### 5.1 第1時 自己の考えを表現した場面

第1時でははじめに、アルカリ性、中性、酸性それぞれにおけるBTB溶液とフェノールフタレイン溶液の色の変化等を既有知識として持っていることを確認するために、「酸とアルカリ 基本事項確認テスト」を実施した(図2)。

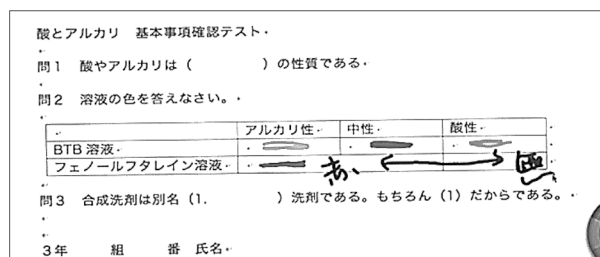


図2 酸とアルカリ基本事項確認テスト答え合わせの様子

表3 学習活動の概要

次	時	『課題』, 主な学習活動
1	1	「酸とアルカリ 基本事項確認テスト」に取り組み、学級全体で答え合わせを行った。 『何が酸性, アルカリ性を決めているのだろうか』 BTB溶液を加えた寒天の中央に切り込みを入れ、そこに水酸化ナトリウム水溶液に浸したろ紙を挟み電流を流し、色の変化を観察する実験を班ごとに行った。その後学級で結果の共有をした。
	2	個人で前時の実験結果の考察を記述した後、班で意見をまとめ、各班の考えを学級全体で共有した。 再度個人で考えを整理した。
2	3	『中和と中性はどのように違うのかを考える』 マグネシウムリボンと水酸化ナトリウム水溶液の入ったビーカーにBTB溶液を加え、そこに希塩酸を1滴ずつ加えて水溶液の色の変化を観察する実験を班ごとに行った。その後、中性と中和の違いに関する自己の考えを図や言葉を用いてワークシートに表現した。
	4	前時に表出した実験結果に関する考えを班ごとに整理した後、各班の考えを学級全体で共有した。その後再度個人で考えを整理した。

これは、この後の学習活動において、既知知識を手掛かりに問いに対する考えをつくっていくことを保障するTのねらいがあったと捉えられる。この時点では具体的でないが、今後他の科学的な説明とリンクさせるPLM(2)や、実験結果と結び付けて推論していくことを促すPLM(3)につながる可能性があると考えられる。

次にTは「ではどんな物質が酸性でどんな物質がアルカリ性なんだろうというのを調べてもらいます。」と大まかな課題を提示し、本時の実験で使用する水酸化ナトリウムが、ナトリウムイオンと水酸化物イオンに電離することを子どもに問いながら確認した。そのうえで、表4・図3のように課題を焦点化していった。

表4 課題提示場面

T	水酸化ナトリウム(水溶液)って何性ですか。
S	アルカリ性。
T	アルカリ性です。ということはですね、NaOHの中の、 $\text{Na}^+$ か $\text{OH}^-$ がおそらくアルカリ性に関係しているんじゃないかということになります。(中略)まずビーカーがあって、ここに液体が入っています。で、水、つまり $\text{H}^+$ と $\text{OH}^-$ 、これで中性だということが分かりますよ。これにNaOHを入れると、 $\text{Na}^+$ と $\text{OH}^-$ になると。するとこの液体がアルカリ性だよねってなると。そうすると $\text{Na}^+$ のせいか $\text{OH}^-$ のせいでアルカリ性になってるわけですよ、っていう予想が立ちますよね。

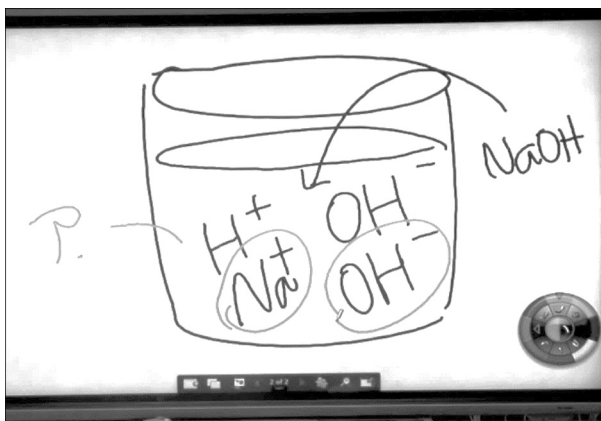


図3 課題提示場面での板書

Tは、電子黒板上に水酸化ナトリウム水溶液内に存在するイオンを書きだし、水( $\text{H}^+$ と $\text{OH}^-$ )が中性であるから、アルカリ性であることを決めるイオン(授業内で

はくアルカリの正体)は、水酸化ナトリウムが電離して生じる $\text{Na}^+$ または $\text{OH}^-$ であるという予想が立てられる、と示した。これによって子どもは、これらから得られる実験結果と、ナトリウムイオンまたは水酸化物イオンの持つ性質とを関連付けて推論すればよいという学習の見通しを持つことができたと考えられる。こうした方向づけの下、班ごとに実験を行った(図4)。

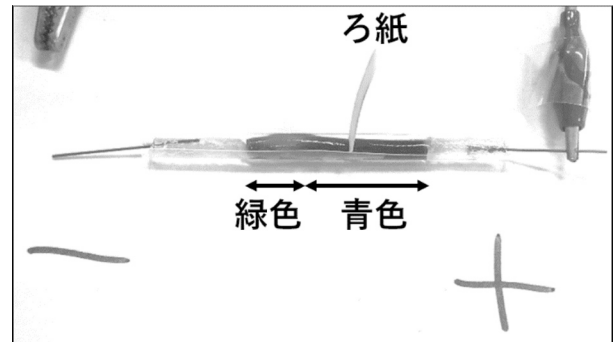


図4 BTB溶液を加えた寒天に水酸化ナトリウム水溶液に浸したろ紙を挟み込んで電圧をかけた実験の結果

実験は、ストローにBTB溶液を加えた寒天を挿入し、その両端をBTB溶液を含まない寒天で挟んだものを用意した。その時点での中央のBTB溶液の色は緑色であった。ストローの中央に切り込みを入れ、水酸化ナトリウム水溶液に浸したろ紙を挟み込み、寒天に差し込んだ炭素棒の右端をプラス極に、左端をマイナス極に接続して電圧をかけた。結果として、ろ紙を挟んだ中央付近からプラス極側の寒天が青色に染まり、マイナス極側の寒天は緑色のままだった。この結果を受けて、S1は図5に示すように自己の考えをワークシートに表現した。

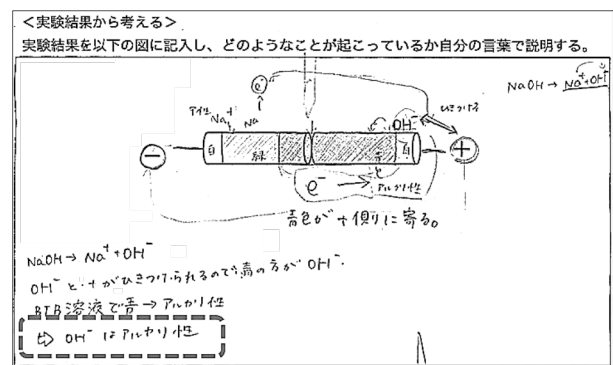


図5 実験後の個人の解釈におけるS1の記述

ワークシートへの記述は、実験結果を図に表したうえで、言葉での説明も求める形式であった。これは、イメージ図や言葉等の表現形態の結び付けを視野に入れた「PLM（4）モデル同士のリンク」の視点からの促しであると捉えられる。

S1は、実験結果である青色の部分がプラス極側に広がったことを図に示し、NaOHが $\text{Na}^+$ と $\text{OH}^-$ に電離すること、青色の部分の原因が $\text{OH}^-$ であること、BTB溶液で青色を呈するのはアルカリ性であること、の3点を言葉で表現した。さらに、それらを総合して考えた結果、 $\text{OH}^-$ がアルカリ性の正体である（図5の「-----」部分）、という考えを説明した。このとき、青色の部分の原因が水酸化物イオンであるとする根拠を「 $\text{OH}^-$ と+（プラス極）がひきつけられるので」と記述した。

ここで、図6に示すように、S1は課題と目の前の事象に正対した自己の概念をモニタリングし、図への書き込みと言葉による表現にする「②意識化」と「③形式化」の段階に達したと考えられる。さらに、水酸化ナトリウムの電離や、アルカリ性のときのBTB溶液が示す色といった既有知識と、実験で明らかになった事実としてプラス極側に青色が広がったこと等、複数の情報を一貫した説明の中に組み込んでいる点で、「④統合」の段階に達していると解釈できる。

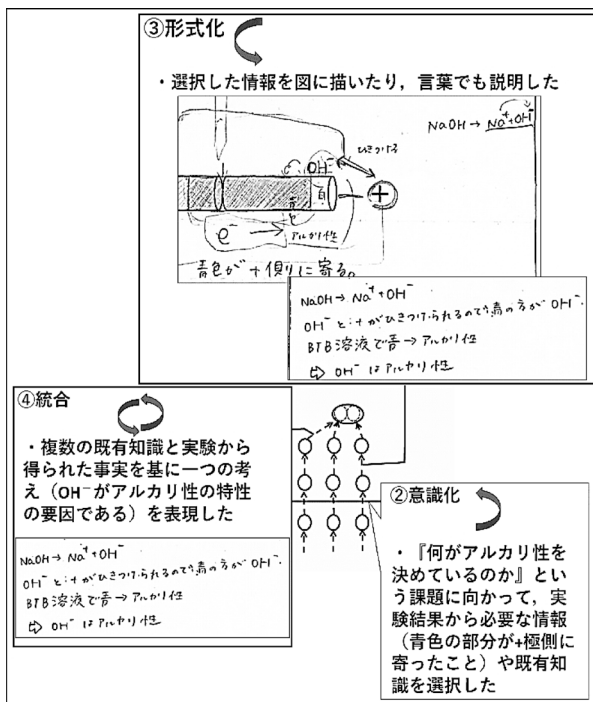


図6 「②意識化」、「③形式化」の段階および④統合の段階

一方で、図5の中央部に見られる「 $\text{e}^- \rightarrow$ 」の記述は、電子の流れに言及しようとしたと解釈できるが、電子の流れと実験結果等を関連付けた説明は見られない。このことから、他者の話を聞いた等何らかの方法で情報を得て書き加えたが、S1にとって理解できる・納得のいく説明ではなかったものと推測される。現在自己が持たない新しい考えを他者から取り入れるか否かは、図1における「⑥融合」の要素に関係する。自己の考え方の枠組みを通して他者の表現を捉えるとき、それがその子どもにとって理解できるものであったり、価値のある表現であると判断されない限り、他者との融合は引き起きにくいことを表す一例になっていると考えられる。

## 5.2 第2時 班で意見を整理し、学級で共有した場面

第2時では、前時の個人の記述と班の実験結果の写真を基に4人班で話し合い、まとめた意見をiPadから電子黒板に送信し、学級全体に向けて発表する活動を行った。Tは班活動の間、教室をまわり机間指導し、発表場面では適宜コメントと班の発表スライドに書き込みを加えたり、徐々に明らかになる学級全体の考えを代弁する形で子どもに関わっていた。

下の図7は、6班の代表者が発表を行った際の発表スライドである。

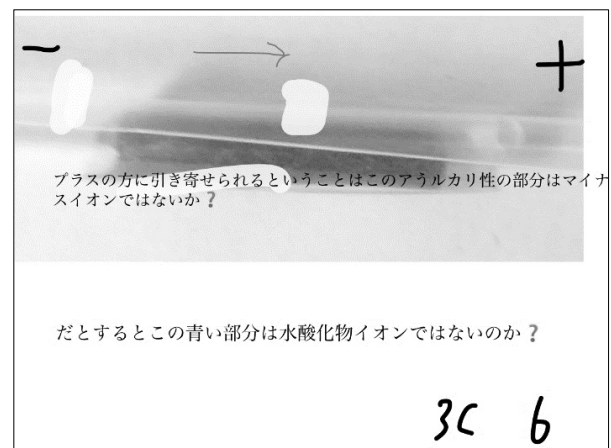


図7 自分たちの班の結果を使った発表のスライド

Tは各班のiPadに前時の自分たちの班の実験結果の写真を送信し、そこに考えを書き込ませた。これは、文字や化学式やモデル図といった表現と、実際の事象とのリンクを図るPLM（3）の視点からの支援であると捉えられる。これを受けて図7に示した6班は、言葉による表現に加えて青色の部分がプラス極側に寄ったことを

強調する矢印表現（図中の「→」）を書き加えた。実際に目の前で観察した事象と自分たちの考えを関連付けて思考していることの表れであると捉えられる。

このように、学級全体の考えとして、「電離するとナトリウムイオンと水酸化物イオンになってそれが各々プラスとマイナスに引っ張られる。そして水酸化物イオンがプラス極側に来ているということは、青色を示すのがアルカリ性だから、水酸化物イオンがアルカリ性の正体なのではないか」とほぼ結論づけられた。授業も終わりに近づく頃、アルカリの正体に加えて酸の正体にも迫った5班の代表者S2が発表した場面を表5に示す。

表5 酸の正体に言及した班の考えを取り上げた場面

S2	緑から青に変わった。 マイナスの方に黄色が寄って、プラスに青が寄った。
S	黄色って何？
S2	え？
T	まあいいよ。それで？
S2	プラスに青が寄って、それがOH <sup>-</sup> じゃないかって考えて、水はOH <sup>-</sup> とH <sup>+</sup> が含まれてて中性だから、H <sup>+</sup> は酸性。
T	なるほど。最後の話ちょっと面白かった。前半はみんなと同じだったけど、つまり水が電離したときにH <sup>+</sup> とOH <sup>-</sup> に分かれますよね。ところが水自体は中性なんだよね。OH <sup>-</sup> があるのに中性だったらおかしいじゃんって話になったわけですよ。ってことは、アルカリ性のOH <sup>-</sup> もあるけど、酸性もある、H <sup>+</sup> はきっと酸性だよ。そしたら足してちょうど中性になるんじゃないの。 別に酸性は何か、とは聞いてないんだけど、水が中性だってことを思い出すと、こっちがアルカリ性だったらこちらは絶対酸性じゃない？ってなったら・・・足したら中性じゃん、って話になって、矛盾しないよね、と考えたよ。

S2の所属する5班は、今回の実験から考えられる、アルカリ性の要因となる水酸化物イオンについてだけでなく、水が中性であるという既有知識から、水が水素イオンと水酸化物イオンに分かれた際、各々が水溶液の性質にどのように関わっているかに言及した。これを捉えたTは、発表スライドに書き込みを加えながら学級全体に向けてS2の発表内容の言い換えを図った。これは、

この時間で明らかになってきた、アルカリの正体が水酸化物イオンであること、それを含む水が中性であること、水が電離すると水素イオンと水酸化物イオンであること、といった複数の科学的な説明を結び付けたS2の説明を価値付け、学級全体に共有する狙いがあったと解釈できる。すなわち、「PLM(2)科学概念間のリンク」の促しであると捉えられる。

これを受けて、S3は次に示す図8から図9のように自己の考えを発展させた。

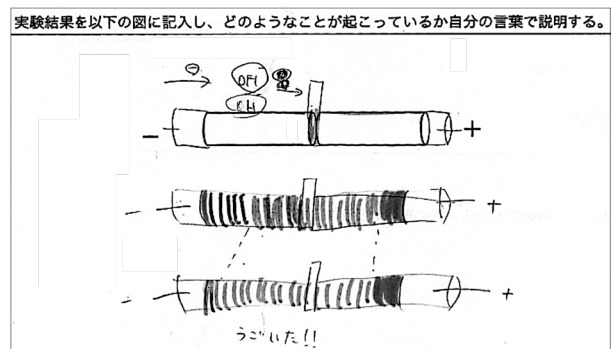


図8 S3の実験後の個人での考察の記述

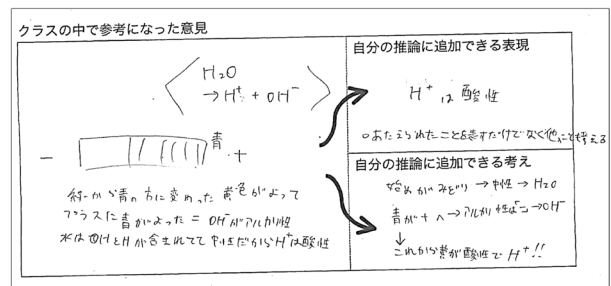


図9 S3の学級での話し合い後のまとめの記述

実験後の個人での記述においてS3は、ほとんど観察事実のみにとどまっていた。この時点では、こういった既有知識や事実を基に考えを表出していけばよいのか捉えられていなかった、すなわち図1における「②意識化」や「③形式化」の段階には十分達していなかったと解釈できる。

その後班での話し合い活動や学級での考えの整理を経て、参考になった考えが図9の左欄に記述されている。ここには、アルカリ性の特性の要因が水酸化物イオンであることを観察事実と既有知識を基にまとめられているほか、S2が発表した酸の正体についても記述されている。学級全体で承認されたもので、自己のこれまでの説

明になかった要素を自覚したうえでの記述である。さらに、右欄の「自分の推論に追加できる考え」では、より自分なりの表現の仕方として論理のつながりを矢印で表しながら、水酸化物イオンがアルカリの正体であることと、水素イオンが酸の正体であることを簡潔に説明することが可能となった。これは、図 10 に示すように、他者の考えから自己に必要な要素を見極め、取り入れた「⑥融合」と、それらを結び付けて自分なりの表現にしなおした「④統合」の段階であると考えられる。S3は他者の考えに触れる学習活動の中で、知識の結び付けを意図したTによって、ある考えが価値付けられたり強調されたりしながら、学級全体で承認が得られていく過程を体験したことによって、他者の考えを自己のものとしていくことができたと言える。

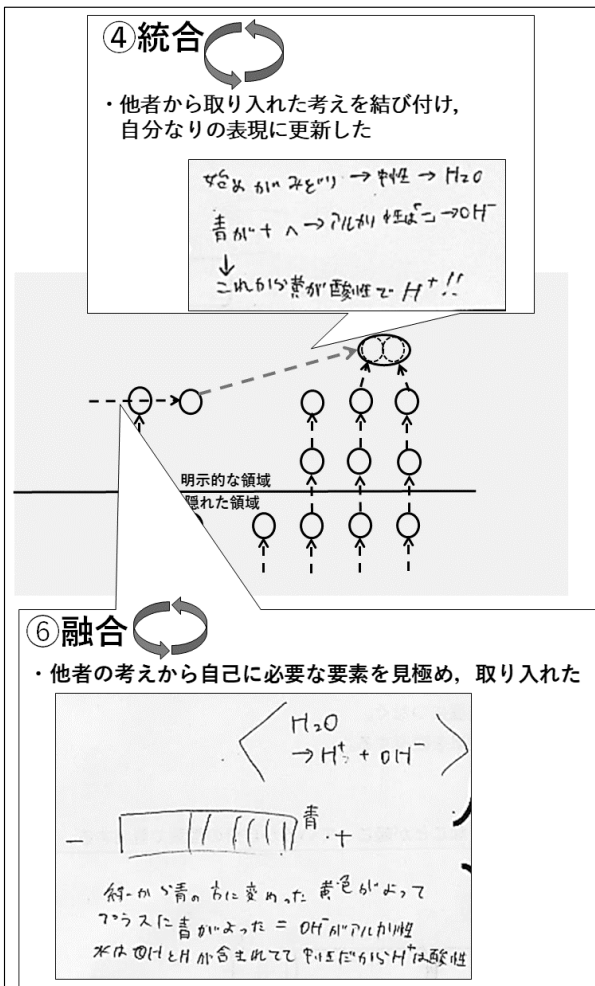


図 10 「⑥融合」の段階及び「④統合」の段階

## 6. 研究のまとめと今後の展望

以上の分析から、教師が意図して行った知識の結び付けの促しが、子どもが自ら概念を発展させていくことに

繋がった様子を捉えることができた。また、知識のリンクを意図した教師の支援の具体として、以下の諸点が挙げられる。

- (i) ワークシート等を使用し表現を求める場面において、言葉や図等の複数の表現形態で記録・記述する機会を保障すること (PLM(2),(3),(4)の視点から、概念変化の②, ③, ④が促進された)
- (ii) 考えを表現する場面において、目下の学習内容に関連して、考えの根拠となり得る既有知識等を共有すること (PLM(2),(3)の視点から、概念変化の②, ③, ④が促進された)
- (iii) 考えを共有し整理する場面において、子どもの表現の中の知識の結びつきに着目し価値付けたり、知識の結び付けの可能性を見いだしフィードバックを与えること (概念変化の⑥, ④が促進された)

本授業実践において、上記(i)～(iii)を踏まえれば、表2を視点とした教授は子どもの概念変化に図11のように関連し、寄与したとまとめることができる。

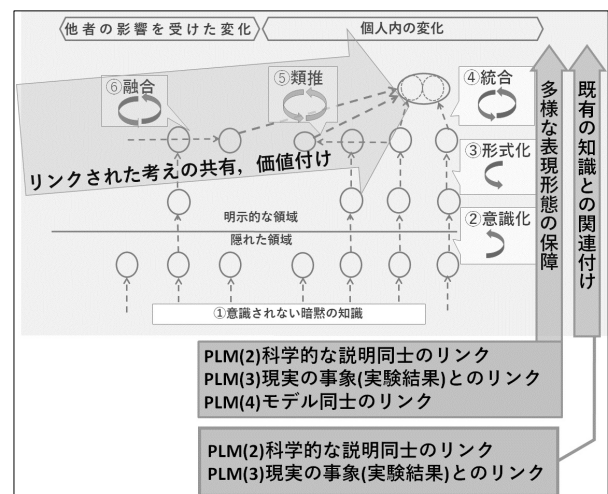


図 11 概念変化と PLM の関連

本授業実践から抽出された以上の教授行動は、教師自身のねらいを軸とした授業計画や、子どもとのやり取りの中での即時的な判断に基づいて行われたものである。学習内容や子どもの学習状況に応じて、機能する要素は変わると考えられる。今後はこうした教師による子どもの学びの評価の視点からも、子どもの能動的な概念構築を促す授業デザインについて検討していく必要があると考えている。

---

引用・参考文献

- 中央教育審議会：「幼稚園，小学校，中学校，高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について（答申）」，2016
- 深谷達史：科学的概念の学習における自己説明プロンプトの効果—SBF理論に基づく介入—，*認知科学*，Vol.18，pp.190-201，2011
- 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」，2015
- Nelson, T. O. and Narens, L. : METAMEMORY: A THEORETICAL FRAMEWORK AND NEW FINDINGS, *The Psychology of Learning and Motivation Vol.26*, 1990
- 佐野菜実・和田一郎・宮村連理：「認知モデルを基軸とした能動的学習を促す理科授業デザインに関する研究」，*臨床教科教育学会誌*，第17巻，第1号，2017
- 三宮真智子：『メタ認知 学習を支える高次認知機能』，pp.1-16，北大路書房，2008
- Scott, P., Mortimer, E & Ametller, J. : Pedagogical link-making: a fundamental aspect of teaching and learning scientific conceptual knowledge, *Studies in Science Education Vol.47, No.1*, 2011
- Taber, K. S. : *STUDENT THINKING AND LEARNING SCIENCE Perspective on the Nature and development of Learner's Ideas*, pp.106-108, Springer, 2014