

子どもの自然認識研究と理科授業

中田朝夫 *NAKADA Asao*

- 1 — 理科授業観の転換
- 2 — 理科授業に影響を与えた学習論
- 3 — 子どもの科学への着目
- 4 — 学習者の意味構成を促進する理科授業
- 5 — 和光大学での教育・研究で常に考えてきたこと

【要旨】理科という科目は、観察・実験を手段とするため、教師側が想定する学習者像は「無垢な状態」で授業内容を受け入れる存在と考えられがちである。筆者自身の理科授業観が転換した経験を踏まえ、理科授業における学習論の変遷にふれることで、子どもなりの自然事象の捉え方（子どもの科学）に着目する意義について述べた。

教育研究において、子どもの自然認識を研究することは、学習者の意味構成を促進する理科授業の構築に結実する。そのための方法論を吟味することで、積極的な意味構成者としての子どもとかかわる教師（授業者）の立ち位置を明らかにすることができる。和光大学で教育・研究に携わってきた8年間は、大学生に、「大学生」はもちろん、「子ども」、「教師」という存在を行き来する想像力を培ってもらったことだった。

1 — 理科授業観の転換

私は大学の学部ゼミでは気象学研究室に所属していた。卒業論文のため3年次生の頃から、都市の地表面アルベド（入射光と反射光のエネルギー比）の数値を決定するために、大学の敷地内のさまざまな地表面（土、草地、コンクリート）や都市の高層ビルの屋上で太陽放射と地表面放射の測定を行っていた。

恩師からは、観察・実験の手順、データの処理、安全面への配慮などを徹底的に教え込まれた。そして、「データ—帰納—法則—演繹—検証（反証）」¹⁾というサイクルをもつ常識的科学的観を身につけた時期であった。これは、自分の未熟さゆえ、学校教育において児童生徒は無垢な状態で、教師からこのサイクルを教えられる存在という学習者像、ひいては理科授業観を暗黙の裡に自身に刷り込んだ時期でもあった。

しかし、ほどなく、この学習者像・理科授業観を徹底的に反省させられる出来事に遭遇することとなった。公立中学校の理科教師として勤務していた時である。パラジクロロベンゼンという物質を使って「融点の測定」という実験を行っていた際、ある女子生徒が「先

生、私たちのグループの温度計が壊れているので、交換してください。」と声をかけてきたのである。実験前に、使用する器具類の点検を行っているため、温度計が壊れている可能性は低い。その女子生徒が続けて言うには、「ガスバーナーで加熱をしているのですが、途中から温度が上がらないのです。」ということである。この発言は、まさにこの実験の核心部分である。すなわち、理論的には、物質が固相から液相に変化するため、加熱のエネルギーが融解熱として消費されるので、温度 53℃ 付近に、時間が経過しても温度が上がらない部分（グラフ上では平らになる部分）が生じるのである。

この女子生徒の発言により、恥ずかしながら、学習者の頭の中は無垢な状態などではなく、自分なりの考え方（子どもの理論）をもっていることに気付かされたのである。この例における子どもの理論とは、「物質が連続的に加熱されるならば、温度は時間の経過とともに上昇していく」というものである。私が、大学院で子どもの自然認識について研究し、理科授業において子どもがもっている「理論」に着目するようになったきっかけでもある。

また、もう一つの出来事もあった。酸化銅と炭の粉を混ぜて加熱した結果、金属光沢のある銅が出現する現象を考察している時である。黒色の酸化銅から、赤褐色の銅が現れたことに、ある女子生徒が「魔法みたい！」と発言した。それを聞いた、いつも元気のよい男子数名が、その女子生徒の発言をからかったのである。「魔法なんておかしいよ」、「魔法は答えじゃないぞ」というようなことだった。要するに、理科授業の答えとしては、不適切だと言いたかったのである。

ニュートンが錬金術師でもあったという説があることはもちろん²⁾、「魔法」という言葉に、この女子中学生がこめた意味というのは、ある物質が想像もしなかった別の物質に変化した驚きを表現したかったのであり、決して不適切ではなかったのである。

2 —— 理科授業に影響を与えた学習論

理科授業を「教授」と「学習」という二つの視点で考えた時に、教師側に暗黙に存在すると思われる学習者像は、先述した「無垢な状態」ということが典型的なものであろう。このように、学習者の捉え方や子どもは理科をどのように学ぶのだろうかという考え方が理科の学習論である。この学習論の理論的展開を支えてきたのは、主に心理学の理論であり、特に、「連合説学習論」と「認知説学習論」であった³⁾。

前者の「連合説学習論」は、心理学の連合説に基づく刺激と反応の結合の原理に着目するもので、学習者の心的プロセスをブラック・ボックスにする。このようなことを背景に案出された理科の教授論、すなわち理科の学習方法に「プロセス・スキルズ」⁴⁾がある。科学者が自然認識に用いる科学研究のスキルを一種の論理系列とみて、これらを学習者に身につけさせようとしたのである。この学習方法は、学習者に必然性がないことはもちろん、現実にはあり得ない科学の世界を前提にしたことと、学習者の認知構造を無視したことか

ら批判された⁵⁾。

一方、後者の「認知説学習論」は、学習者の認知構造を重視した考え方で、学習とは認知構造の変換と捉えるものである⁶⁾。理科授業にはさまざまな理論が影響を与えたが、特に大きな影響を与えたものは、ピアジェ (Piaget, J.) による認知発達理論である。ピアジェにおける発達とは、一言でいうと発達段階における構造の質的变化である。そして、その変化を支える概念として「操作的側面」に着目している。つまり、人は環境と相互作用することによって「同化」と「調整」を行い、構造から構造への変換がなされるというものである。そして、この変換にあずかる構造の概念を「シエマ (schema)」とした。岡本 (1986) はこれをわかりやすく「自分が引き起こせる行動の型」あるいは「行動を可能にしている基礎の構造」と表現している⁷⁾。つまり、ボールを投げるという動作を支えるのはシエマであるし、リンゴのイメージを思い浮かべられるのも、三段論法を用いられるのもシエマによるというのである。

確かに、私が新任教師であった頃、先輩の先生方はさかんに「発達段階」という言葉を使って議論していた。思い起こせば、その議論の中で「発達段階」という言葉が使われていた文脈は、「□□という学習内容は○学年だとまだ早いのではないか」や「○学年では、□□という学習内容を終えないと、△△という学習内容を教えることはできない」といったことだったように記憶している。

ここに、理科授業において、ピアジェの認知発達理論を導入する際の課題点が存在する。すなわち、教育という教授意図を伴う活動が、ピアジェが意図した研究の枠組みを十分に意識しているかどうかという点である。つまり、ピアジェの関心は、波多野 (1986) が言うように「生物たる人間の考えた数や論理が、どうしてそのまま外の世界に適用され、うまく適合するのだろうかという、いわば適応の問題の一つとして、解決への努力がおこなわれる」⁸⁾ という面にあり、ピアジェが行った、子ども達に馴染みのある文脈を捨象するさまざまな実験は、そのような点で意味があったのである。このようなピアジェの意図を無視して、教師が論理操作自体を教え込もうとしたり、教材の偏った評価を行ったことは、やはり、子ども達の世界を完全に無視した教え込みにつながるのである。

もう一人、理科授業を考える際に忘れることができない人物がブルナー (Bruner, J.S.) である。アメリカでは、ソビエトによるスプートニク開発を受けて、高度な科学技術を習得した人材を育成するという時代の要請があった。その影響もあり、ブルナーの関心は、ピアジェのように、発達の過程を静的にとらえるのではなく、教授の方法によりどの発達の段階の子どもにも効果的に教えることができるとしたのである⁹⁾。このようなブルナーが提唱した学習は「発見学習」で、学問の本質となる「構造」を発見することで、知的に飛躍することができ、また学習の動機づけになることも強調した。デューイが重視した「生活」とは距離のある自然科学を視野に入れるには、「構造」という考え方をを用いることで理解を深めようとしたのである。つまり、この学習方法は、科学者と同じ発見を学習者に体験させることで、自然科学の概念構造を学習者の認知構造に組み込もうとしたものであ

る。しかし、実際の学習場面では、両構造のズレが大きすぎることで、学習時間がかかりすぎることで、そして、発見があまりに誘導的になってしまうことなどの問題点が指摘された¹⁰⁾。

3——子どもの科学への着目

先述したように、理科の学習論は、学習者の心的プロセスをブラック・ボックスにする学習観から、心的プロセスに構造や機能を想定することで、子どもはいかに学ぶのかという学習観にかわってきた。さらに、このような学習観を背景に、「発達の最近接領域」¹¹⁾、「認識の領域固有性」¹²⁾や「相対主義的科学観」¹³⁾等の新たな視点が導入されることにより、子ども個々にみられる特徴的な自然認識に着目されるようになったのである。

表1は、子ども達にみられる自然認識の領域固有性の例である¹⁴⁾。さまざまな領域にわたって、子ども達は大人と同じ用語を使いながらも、独自の自然認識を内包させていることがわかる。「子どもの科学」ともいえる、その認識内容には子どもなりの論理や根拠が働いていることがわかる。このような子どもなりの自然認識は、「素朴概念」、「前概念」、「プリコンセプション (preconception)」等と呼ばれる。科学概念に照らすと、明らかに間違っているとと思われる子どもなりの自然認識も、先の理科学習論の議論に基づくと、重要な意味をもつことになる。つまり、子どもの主体性を大切にする理科授業を考えた場合、逆に、着

表1 子ども達の自然認識の領域固有性

領 域	認識内容	年 齢	研究者
力 学	動いている物体は力を持っており、運動を維持するのに一定の力を必要とする。	すべての年齢	Watts, 1983 ¹⁾
	摩擦力は二つの動いている表面が接触したときに生じる作用である。	すべての年齢	Stead, 1981
光 学	昼よりも夜の方が光は遠くへ進む。	9-15歳	Osborne, 1980 ¹⁾
物質粒子	空気を構成している粒子間には酸素、水蒸気、空気が存在する。	12-14歳	Osborne, 1983
熱と温度	熱には、冷たい熱と温かい熱がある。熱と温度は同じ。熱は高温を作り出す素である。	すべての年齢	Erickson, 1979 ¹⁾
体積置換	重い物体ほど置換する水の量が多い。	すべての年齢	Linn, 1983 ¹⁾
浮き沈み	形にかかわらず、重い物体は沈み、軽い物体は浮く。	4-8歳	Linn, 1973 ¹⁾
生 命	動くことのできる物が生きているのである。	10歳まで	Carey, 1985
岩 石	岩石とはこぶし大の大きさで、つやのない、ゴツゴツとした物である。	11-17歳	Happs, 1982
地 形	海溝は海と陸の境界である。	14歳	Freyberg, 1981
植 物	木は植物ではない。草やタンポポは雑草であり、植物ではない。野菜は植物ではない。種は植物ではない。	10-15歳	Bell, 1981
イ オ ン	電気分解中の水溶液の中には電気は流れていない。	13歳	Osborne, 1980

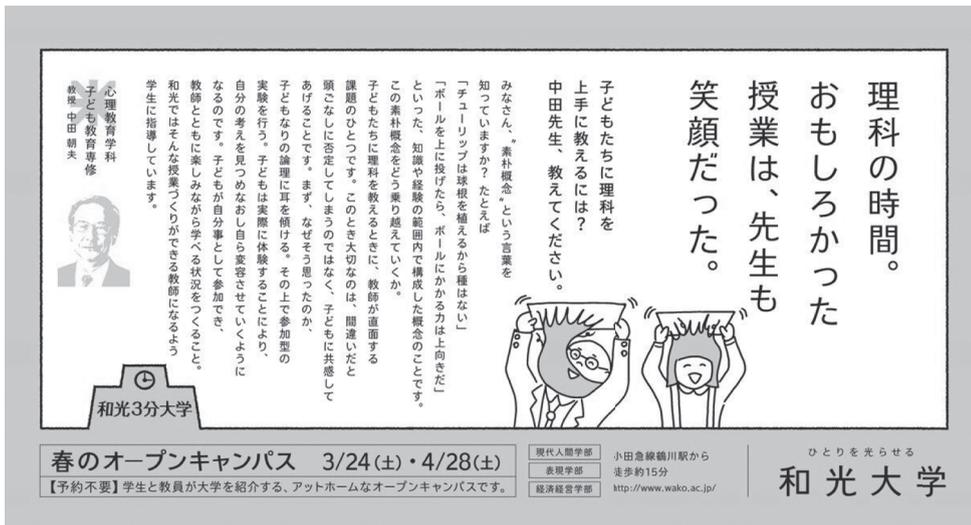
(森本, 1992) より筆者作成。

目しななければならない内容となるのである。この点について述べたことが、図1の「和光3分大学」のポスターである¹⁵⁾。

このような子ども独自の自然認識を肯定したうえで、理科授業を構想していくにはどのような視点が必要であろうか。この点に重要な示唆を与えるのが、ホワイト (White, R.T.) による「記憶要素」¹⁶⁾ の考え方と上野 (1987) による「理解のプロセス」¹⁷⁾ に関する知見である。

前者は、記憶のタイプ分けを行うことで、幅広く子どもの知識や理解に寄り添うことができる。その内容を示したものが表2である。学校教育では、知識や概念の名辞的な面、すなわち、ホワイトが言うストリングや命題が強調されやすい。理科の試験に出題される

図1 和光3分大学



https://www.wako.ac.jp/img/about/3minute-university/2018_003.jpg より

表2 記憶要素の七つのタイプ

要素	簡単な定義	例
ストリング	一つひとつが分離されず、全体としてまとまりを持った形で記憶されているひとつながりのことは、あるいは記号	すべての作用には、これと等しく向きが反対の作用が働く
命題	概念（ことば）の性質あるいは概念間の関連性についての記述	イースト菌は単細胞である
イメージ	感覚についての心的表象	アザミのじょうご形、塩素の臭い
エピソード	経験あるいは目撃した事象についての記憶	実験室での事故、顕微鏡の組み立て
知的技能	心的な課題遂行能力	化学反応式の両辺の収支を計る
運動技能	肉体的な課題遂行能力	ある印まで液体を注ぐ
認知的方略	思考をコントロールする際の概括的一般的技能	別の解釈を受け入れる、学習目標を決める、学習が成功しそうかどうか判断する

(ホワイト, 1990) より筆者作成。

「H₂O」や「直列回路に流れる電流の大きさはどこも同じ」などが典型例である。試験には役立つかもしれないが、納得感は得られていない。学習の場で、このようなストリングや命題への過剰な重みづけがなされると、理科授業の中で子どもが自分の知識や経験を使って事象を考えようとする意欲は低下する。したがって、記憶を七つのタイプに分けて、教師がそのどれをも重視することは、子どもが自然事象について考える際のハードルを低くすることにつながるのである。

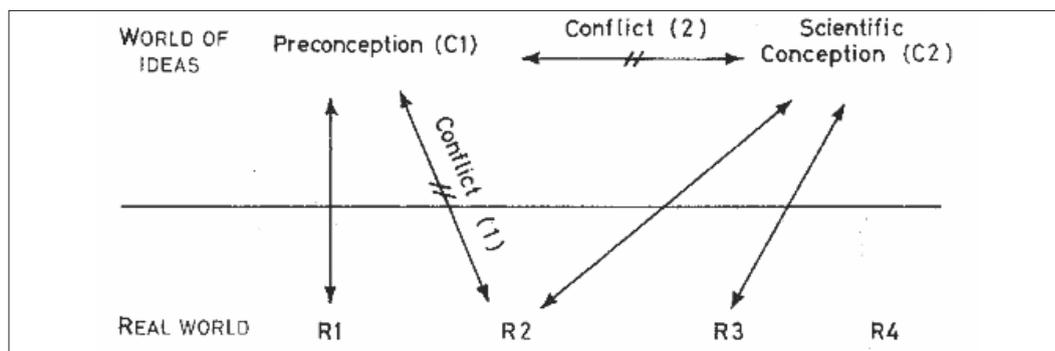
後者は、実際の理科授業における学習者の記述に、事象を構成する要素を生き物と見立て物語を展開させる内容が多々あることと関係している。例えば、中学校で学ぶ水の電気分解の実験では、教科書の記述によると、「電気分解の装置」—「電極」—「反応の違い」—「気体の正体」と、先述したストリングや命題の伝達が強調されている。しかし、学習者は、電気のはたらきに着目し、「電気」が「水」に何らかの作用を及ぼし、結果として「気体の発生」が起きたという三者の関係性をもって事象を観察しているのである¹⁸⁾。このことについて、上野は世界を機能的意味や関係としてとらえることの重要性を指摘し、「キャストイング・プロセス」と「シミュレーション・プロセス」を取り上げている¹⁹⁾。つまり、先の学習者は、「電気」、「水」、「気体」というキャストイングのもと、「電気」が「水」に何らかのはたらきかけを行い、結果として「気体」が出てきたというシミュレーションを思い描いていたのである。

4 — 学習者の意味構成を促進する理科授業

理科授業で大切なことは、観察・実験を安全に行い結果を考察することであるが、そこには先述したように、子ども達一人一人が自然事象に対して意味の構成を行う必要がある。小学校の教師のタマゴである大学生には、自分が幼かった頃感じた自然事象の不思議さ、自分の経験や知識を使ってその事象を見つめる楽しさを蘇らせてほしいと常に考えてきた。

ハッシュウェ (Hashweh, M.) は、学習者の科学概念の変換を図2のように説明する²⁰⁾。

図2 概念変換のモデル (Hashweh, M. 1986)

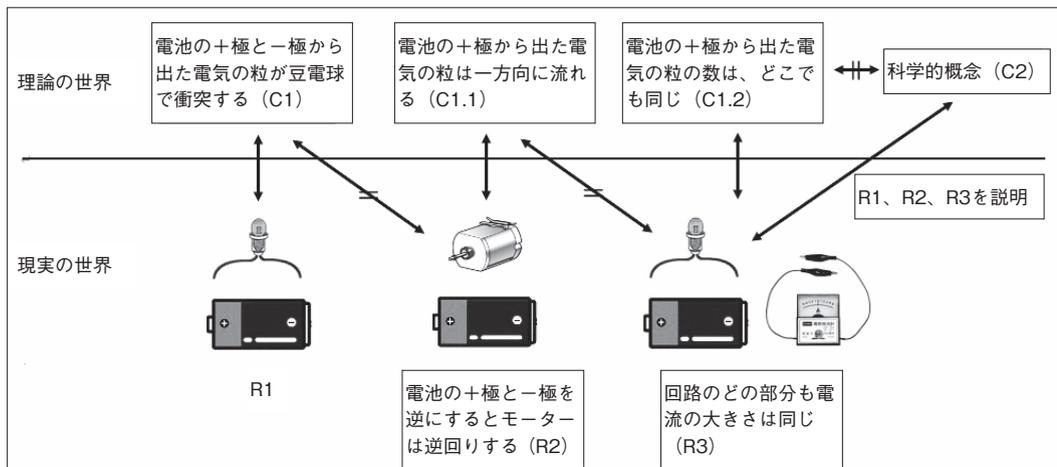


すなわち、学習者は現実世界の自然事象 (R1) を解釈するために、理論として素朴概念 (C1) を使うことができる。ところが、別の自然事象 (R2) に出会って、その素朴概念 (C1) をうまく使えないことがわかる。そこで、素朴概念 (C1) とは矛盾するが、科学的概念 (C2) を使うとその自然事象 (R2) をうまく解釈できる。そして、同じようにその科学的概念 (C2) は、別の自然事象 (R3) もうまく解釈できる。このようにして、学習者の中に科学的概念が習得されていくという考え方である。図2を小学校4年生で扱う「電気の回路」を例にして具体化すると図3のようになる。

図3が示すように、ある学習者は、豆電球の明かりがつくという現実の世界 (R1) に対して、電池の両極から出た電気の粒が豆電球で衝突するという素朴概念、つまり学習者なりの理論 (C1) をもつ。次に、豆電球の代わりにモーターをつないで、電池の+極と一極を逆にするとモーターは逆回りをするという現実世界 (R2) に出会う。すると、その学習者は電気の粒は電池の+極から出て一方向に流れるという理論 (C1.1) に変更する。そして、暗黙の裡に、電気の粒は消費されると思っていた学習者は、回路のどの部分でも電流の大きさは同じという現実世界 (R3) に出会う。そうすると、回路を動く電気の粒の数は、回路のどの部分でも同じという理論 (C1.2) を構成する。このように、学習者は現実の世界に合うように自分の理論を修正していく。この次は、次第に電池は消耗し、最後には豆電球がつかなくなったり、モーターが回らなくなったりすることを説明する理論を構築することになる。小学校理科の学習内容としては、ここまで求められていないが、小学校の教師を目指す初等教育課程に在籍する大学生への講義としては、素朴概念と科学概念の間で揺れ動く子どもの姿を学ぶ恰好の題材となる。

和光大学の講義の中で、大学生が実際に作成したワークシート²⁾を図4に示す。大学生がワークシートを作成した状況は、図3の現実の世界 (R3) に加え、時間が経つと豆電球

図3 概念変換のモデルの具体化



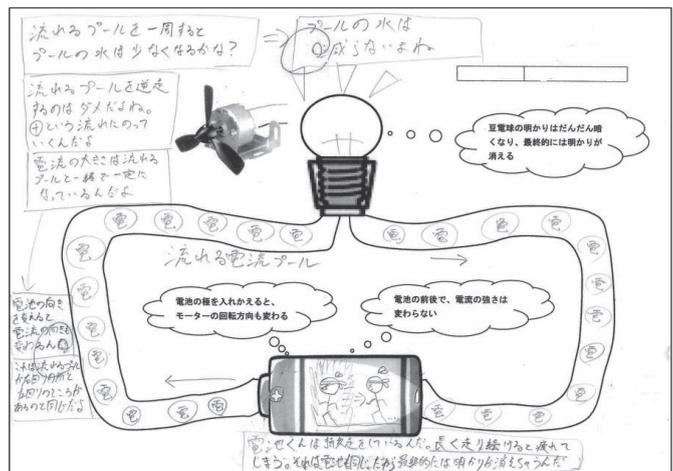
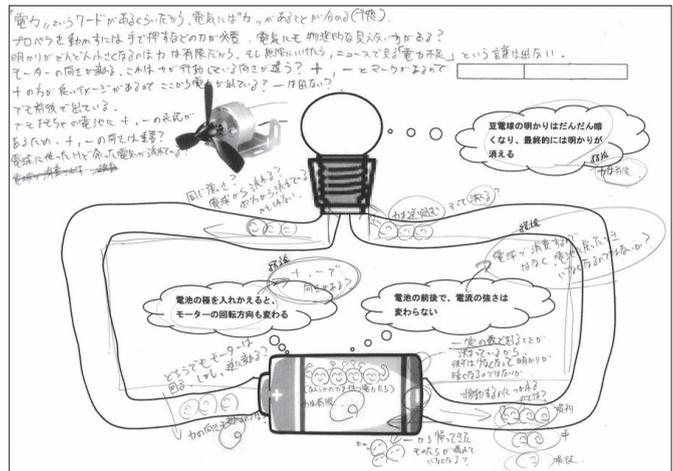
の明かりは暗くなり最後には消えることを条件としたため、大学生が構成した考えは、図3には明示されていないが、理論 (C1.3) に相当することになる。

図4の上部の大学生の考え方(理論)は、「力」をもった電気の粒が一方方向に移動することで、豆電球を光らせたりモーターを回転させたりすることを基本的な考え方としている。モーターの回転方向が変わることは電気の粒が移動する方向の違いによって説明している。そして、電流の強さが電池の前後で変わらないことは電気の粒の数が一定であることによって、最後には豆電球の明かりが消えてしまうことは電気の粒がもつ力は有限で最終的に電気の粒は電池内で消えてしまうことによって説明している。

図4の下部の大学生の考え方(理論)は、「電池くん」が流れるプールの水の中を走っていることで、豆電球を光らせたりモーターを回転させたりすることを基本的な考え方としている。モーターの回転方向が変わることは流れるプールの水の方向の違いによって、電流の強さが電池の前後で変わらないことはプールの水が減っていないことによって、そして最後には豆電球の明かりが消えることは長く走った電池くんの疲れによって説明している。

このように、これから教員を目指す大学生が、小学生になったつもりで電気の回路を考察することは、当然であるが、科学概念を理解し直すということによって重要である。そして、自分もつ知識や経験を存分に使ったり、仲間とかかわり合ったりしながら自然現象を紐解いていく醍醐味を味わうことは、子どものどんな考えやつぶやきも大切にできる教師、子どもに共感し一緒になって物事を探究していくことができる教師の萌芽として、不可欠な要素であると考えられる。

図4 大学生による電気回路の説明



5 —— 和光大学での教育・研究で常に考えてきたこと

理科という教科は、特に、「教授」に重点を置かれがちな教科である。なぜならば、自然科学の知見としての知識や理解の内容が明確なためである。そのため、学習者が理科をどう学ぶかという側面は不問にされ、自然科学の知見をわかりやすく伝達することで、理科の目標が達成されると考えられがちである。

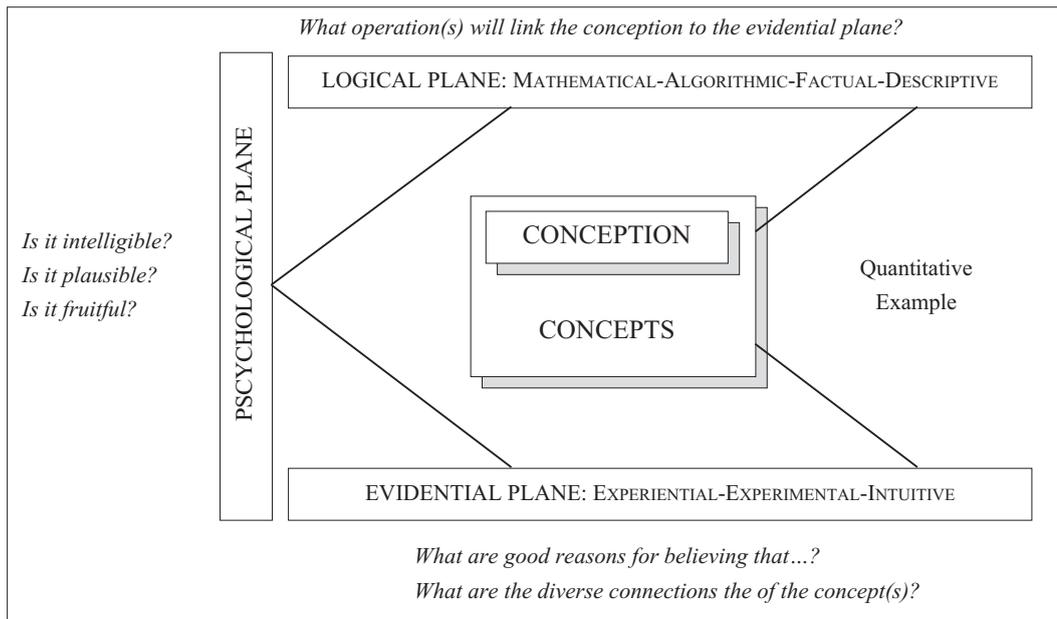
子どもの学びを大切にできる教師の萌芽として、大学生が小学生になったつもりで自然事象を考察する意味については既に述べたとおりだが、ここでは、そのことについてもう少し深く考えてみたい。

スティナー (Stinner, A.) は、学習者が科学概念を構成するには、「論理面 (LOGICAL PLANE)」と「証拠面 (EVIDENTIAL PLANE)」を結びつけるだけでは難しく、「心理面 (PSYCHOLOGICAL PLANE)」がその間をとりもつ必要があるとしている²²⁾。そのことを説明したものが図5である。

つまり、子どもが教科書などに提示される科学的概念を理解するには、観察・実験の結果を入手するだけでは難しく、そこには両者を結びつける「わかりやすいか?」、「もっともらしいか?」、「充実しているか?」といった心理的な側面の納得感が必要なのである。

図5は、先述したように、理科の授業では、適切な観察・実験を行うことで科学的な概念が学習者に理解されるであろうという予定調和的な考えへの警鐘ととらえることができる。

図5 理科における概念発達のモデル



(Stinner, A. 1995) より筆者作成。

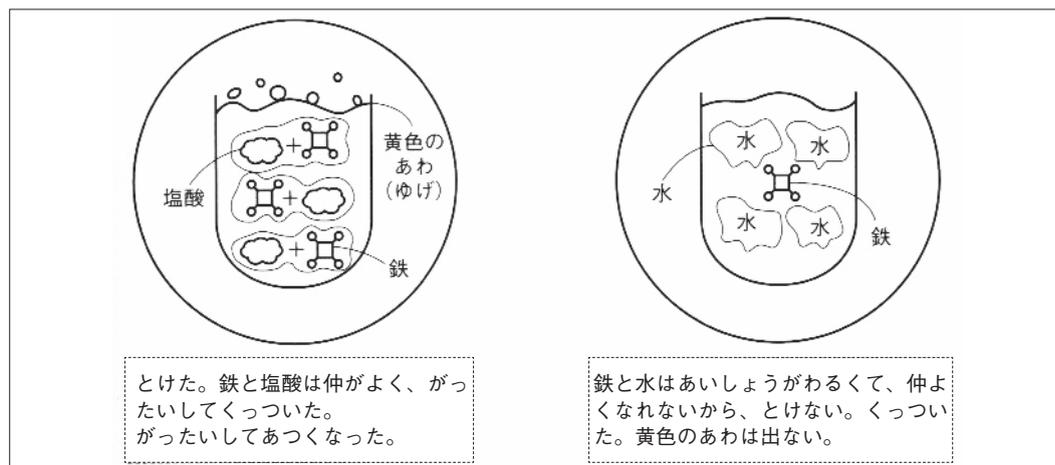
実際の授業例を紹介する²³⁾。小学校第6学年の「水溶液の性質」という単元では、水に対して変化しない鉄が塩酸の中では気体を発生させながらとけてしまうことや、その液体を加熱することで出現する物質は、もとの鉄とはまったく違った物質になっていること等を学習する。ここで扱う学習内容は、「液性」に関する科学概念である。絵の具をとく、食器の汚れを落とすといった日常で経験する「変化」をもとに、金属がとける、金属が見えなくなる、金属がまったく別の物質になるといった日常では経験しにくい「変化」を理解することである。つまり、「生活概念」から「科学概念」への思考の移行であり、「変化」という言葉がキーワードになる。

授業では、子ども達が、塩酸の中に鉄片を入れる実験の結果と水の中に鉄片を入れる実験の結果を比較し考察する。この際、授業者が重視した点は、子ども達が「鉄」、「塩酸」、「水」に着目し（キャストイング）、それらがどのようなやりとりを行ったのか（シミュレーション）ということ、子ども達に十分に考えさせ、互いにやりとりする場面も設けたことである。子ども達の考えを模式的にまとめると図6のようになった。

この単元における、学習者の一般的な発言は、「鉄は塩酸の中で黄色い泡を出してとけた」、「鉄は水の中でとけなかった」のような内容である。これは、スティナーの言葉を借りれば、「論理面」と「証拠面」の組み合わせである。しかし、先のように授業者が両者をとりもつ「心理面」に着目することで、子ども達の説明には、それぞれが保持する豊富な経験や知識が内包されることになる。図6にある「あいしょう」という言葉は子ども達にとって「わかりやすく」、さらに、鉄と塩酸を「+」の記号で結びつけ、両者を線で囲むことで熱さを表現することは「もっともらしく」、そして、試験管の中の様子を夢中で絵と言葉で表現し仲間と笑顔でやりとりする姿は、まさに「充実している」様子である。

教師をめざす大学生には、子どもになることで、理科学習で本質的な学びとは何かを考えてもらった。同時に、そのような理科授業を実現するには、教師がどのような工夫を行

図6 学習者によるワークシートの例 (中田, 2017)



えばよいのかも考えてもらった。そして、その問いを考えている大学生としての自分が、ここ和光大学で学んでいるということを常に意識してほしいと願ってきた。私が和光大学の8年間で常に考えてきたことである。

《註》

- 1) 村上陽一郎 (1989) 「新しい科学論」, 講談社, pp.94-95
- 2) 小山慶太 (2018) 「<どんでん返し>の科学史」, 中央公論新社, pp.14-17
- 3) 家野等 (2000) 「科学教育における学習論の役割」, 『物理教育』第48巻第2号, pp.100-103
- 4) 森本信也 (1992) 「理科学習論の勃興 —カリキュラム改革運動—」『理科教育学講座4』, 東洋館出版社, pp.5-41
- 5) 同上書
- 6) 家野等 (2000), 前掲書
- 7) 岡本夏木 (1986) 「ピアジェ,J.」『発達理論を築く』, ミネルヴァ書房, p.135
- 8) 波多野完治 (1986) 「ピアジェ入門」, 国土社, p.117
- 9) ブルーナー (1970) 「教育の過程」(鈴木祥蔵・佐藤三郎訳), 岩波書店, p.42
- 10) 家野等 (2000), 前掲書
- 11) 例えば、ヴィゴツキー (1982) 「思考と言語 (下)」(柴田義松訳), 明治図書出版
- 12) 例えば、コール／スクリブナー (1985) 「文化と思考」(若井邦夫訳), サイエンス社
- 13) 例えば、クーン (1989) 「科学革命の構造」(中山茂訳), みすず書房
- 14) 森本信也 (1992), 前掲書, p.62
- 15) 2018年3月に掲出
- 16) ホワイト (1990), 「子ども達は理科をいかに学習し教師はいかに教えるか」(堀哲夫・森本信也訳), 東洋館出版社, pp.40-64
- 17) 上野直樹 (1987) 「わかることの深まりと広がり」『教育の方法2』, 岩波書店, pp.70-109
- 18) 中田朝夫・森本信也 (1994) 「学習者の意味構成を促進する理科の教授方策に関する一考察」, 日本理科教育学会研究紀要第34巻第3号, pp.51-61
- 19) 上野直樹 (1987), 前掲書, pp.74-75
- 20) Hashweh, M. 1986, Toward an explanation of conceptual change, *International Journal of Science Education*, 8(3), pp.229-249
- 21) ワークシートについては、永井秀樹・川北一彦 (1999) 「子どもが考えた電流モデルの有効性について」日本理科教育学会研究紀要第40巻第1号, pp.35-43を参考に作成した。
- 22) Stinner, A. 1995, Contextual settings, science stories, and large context problems :Toward a more humanistic science education, *Science Education*, 79(5), pp.555-581
- 23) 中田朝夫 (2017) 「生活概念 (日常知) から科学概念 (学校知) への子どもの思考の移行」, 森本信也編『理科授業をデザインする理論とその展開』, 東洋館出版社, pp.46-62