



Title	構成主義に基づく科学的概念形成論の批判的検討 : 熱と温度の概念を中心として
Author(s)	丸山, 博
Citation	教授学の探究, 10, 47-62
Issue Date	1992-03-17
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/13575">https://hdl.handle.net/2115/13575</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p47-62.pdf



# 構成主義に基づく科学的概念形成論の批判的検討

—— 熱と温度の概念を中心にして ——

丸 山 博

(北海道大学大学院教育学研究科博士後期課程1年)

## 0 はじめに

欧米の科学教育研究においては近年構成主義に基づく生徒の科学的概念形成の研究がよく行なわれている。日本でも、それらが紹介され、ほぼそのままそれらを生徒や授業の分析に応用する傾向が見られる。小論では、構成主義の学習観を概観し、それに基づく授業の構想及び具体的な教授プランを熱と温度に限定して詳しく検討することによって、構成主義による科学的概念形成論の有効性とその限界を教育内容方法研究の視点から論じたい。

## 1 構成主義的学習観の概観

### 1. 1 構成主義の規定

佐伯卓也(1990)は、構成主義を成立させる次の二つの仮説(Lerman 1987)に基づきながら、小山正孝(「数学教育における構成主義の哲学的及び認識論的側面について」第22回数学教育論文発表会論文集, 1989)に依拠して構成主義を二つのカテゴリーに分類した<sup>1)</sup>

(1)知識は、認識主体(cognizing subject)により能動的に構成されるものであり、受動的に受けとられるものではない。

(2)知るようになること(coming to know)は、人が経験的世界を組織化する適応過程であり、それは知る人(knower)の心の外に以前から独立して存在する世界を発見することではない。

小山(1989)は、(2)を前段「…適応過程」と後段「それは知る人…」以降に分け、前者を(2)、後者を(3)として、(1)と(2)までの構成主義を平凡な構成主義、(1)～(3)までを過激な構成主義とした。過激な構成主義の場合は、客観的な世界も子供が認めないかぎり存在しないことになってしまうため、自然科学教育では扱うことができない。したがって、ここでは、構成主義を「知識は、外部から与えられたものが内面化されるのではなく、学習者一人一人が人間や事物に積極的にはたらきかけることによって彼自身のなかに構成されると考えるもの」と規定し、主にドライバー、オズボーン、エリクソン、ティベルジャンなど欧米やオーストラリアを代表する構成主義者たちの研究成果について検討する。

構成主義が自然科学教育において科学的概念形成の理論として注目されるようになった経緯をドライバー(R. Driver 1983)<sup>2)</sup>に基づいて整理すれば次の二点にまとめられる。

(1)ブルーナー批判:

過去2, 30年の科学教育の特徴の一つは、事実のカタログをただ並べることから、化学であれば原子論(atomic theory)、物理であれば運動論(kinetic theory)というように統一的な概念に重点がおかれるようになったことである。具体的にはブルーナー(J. S. Bruner, The Process of Education, 1963)によるアプローチがあげられる。しかし、ブルーナーによる「転移」の議

論に関する問題の一つは科学者にとって明らかな関係でも生徒には明らかではないということである。しかもブルーナーの科学教育では、オーズベル(D. P. Ausubel, Educational Psychology, 1968)が指摘したように授業以前に子供自身が日常経験から獲得した概念(これには前概念, 直観, もう一つの枠組み, 小理論, 素朴概念などいろいろなよび方があるが, 小論では前概念として統一する)は, 彼らの学習に重大な影響を与えるにもかかわらず, ほとんど考慮されていない。したがって, 子供の認識の枠組みを理解し, それに基づく科学教育が必要とされなければならない。

## (2) 帰納主義批判:

過去2, 30年間の科学教育のカリキュラム開発におけるもう一つの特徴は発見法 (heuristic method)が強調されてきたことである。すべての知識は客観的な観察に基づくとする帰納主義的立場は, 発見法の推進運動のなかでとり上げられ, ナフィールド科学によって採用された発見法のより素朴な解釈のいくつかに見られる。発見的アプローチにおいては, 生徒たちにじかに事象を探索させれば, 彼らは一般化や原理そのものを帰納することができるものとされる。しかし, 子供たちがそのような作業によって理論的なモデルを発見することはない。ポパー, クーン, ファイヤアーベントなどの科学哲学者たちは, こうした帰納主義的立場の限界に気づき, 想像力が科学理論の構築に果たす役割の重要性を認めてきた。ポパー(K. Popper, Normal science and its dangers)がいうように「私たちは私たちの理論の枠組みにとらわれた囚人」である。このことは学校科学にとっても意味をもつ。子供たちも前概念にとらわれて, 彼ら自身に特有の「概念の眼鏡」を通して世界を見ているからである。

## 1. 2 学習過程における前概念の位置づけ

構成主義者たちは, 子供たちが体系的な教育を受けなくても授業で扱われる現象に関するある種の考えや解釈をもって学校の授業にのぞむものとして, それらを前概念 (prior ideas) とよび, 前概念は「日常的な活動に埋め込まれ, 実感的な知識となっているため, 科学を習得したはずの理科系大学生ですら日常的な場面ではそれらを用いて自然を理解しようとするのだ」<sup>(3)</sup>と考えている。つまり, 前概念は, 科学的概念に対して直観的な考えあるいはもう一つの概念ともいわれ, 多くの人々に共有され, 首尾一貫していないにもかかわらず強固であり, 容易には変容しないものとされているのである。前概念の具体例の一部には次のようなものがあげられる<sup>(4)</sup>

- (1) 熱はある種の「物質」である。金属棒の一端が熱せられたとき何が起きたのかと尋ねられると, 12歳の生徒は次のように説明する。「熱は, こらえられなくなるまで棒の一端に貯められて, その後, 棒にそって動きだす。」
- (2) 「熱さ」と「冷たさ」は別物である。氷の棒を水中に入れたときに何が起こるのかを説明するのに12歳の生徒は次のようにいう。「冷たさがいくらか氷の棒から水のなかに移った。」
- (3) エネルギーは使い果されてしまうある種の燃料である。ねじ巻きつきのおもちゃを放した後何が起こるかを討論しているときに, 13歳の少女は, 「おもちゃが動いているときにはエネルギーをもっていましたが, 使い果されてしまった」といった。
- (4) より高くもち上げられた物体はより重い。それが落ちるとより強く地面を打つからと子供たちは主張する。
- (5) 物体が押されると, その「押し」はその物体のなかに入る。「押し」は物体が遅くなると失わ

れる。

イギリスのドライバー(R. Driver 1983)は、子供はどんなに幼くても事物に対する考えをもっており、これらの考えは彼らが行なう観測、彼らがたどる推論および実験の構成の方法にも影響を与えるとして、ピアジェを引用して学習過程を次のように説明している<sup>(5)</sup>(図1)。学習とは学習者が環境との相互作用や予測と観察との間に起こりうる認知的対立の解決を通して自身自身の知識を構築する積極的なプロセスである。換言すれば、新しい知識が既存の認識構造と相互作用した結果、認識構造の変化つまり調節が起こり、より発達した認識構造になることである。もし、学習者の既存の認識構造と学習環境との間の不一致が大きければ、理解はまったく起こらないし、不一致がなければ、知識は理解されるが、認識構造には何の変化も起こらない。したがって、知識が理解されるかどうかは、学習環境だけでなく、学習者の既有的認識構造にも依拠しているのである。

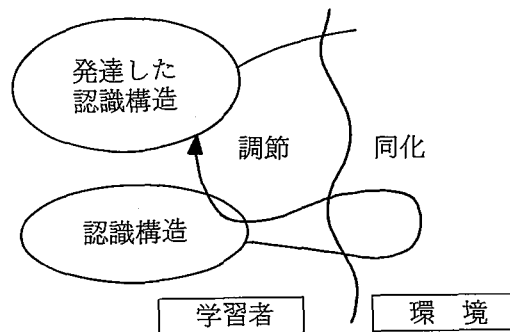


図1 学習による認識構造の発展

オーストラリアのオズボーンら(1985)は、ウィットロックの生成的学習モデルを子供の実態に適合しうるものとし、教師に必要とされるのは、生徒たちが彼らの文化あるいは個人の経験の結果として何をすでに学習しているかを見いだすことにあると述べている<sup>(6)</sup>。生成的学習モデルの概要<sup>(7)</sup>は以下のようにまとめられる。

- (1)学習者は、環境にある、学習者にとって有用だと思われる感覚情報のみを選択的に取り入れ、他は無視することにより、記憶を蓄えたり、処理したりする。
- (2)学習者は、入力された情報と彼の記憶内容との間において、関連性が認められたとき、これら二つの情報の間の結びつきをつくることができる。しかしながら、このような結びつきが教師の意図しない方向で行なわれることもある。
- (3)学習者は、記憶内容にある情報を引き出し、これを用いて能動的に入力された感覚情報から意味を構成する。
- (4)学習者は構成された意味を記憶内容及び経験に照らしあわせて検証する。
- (5)学習者は、潜在意識として、記憶のなかで新たに構成された意味に対してある種の位置づけを行なうことになる。すなわち、記憶のなかで、新しい考え方と以前からある考え方を同時にとらえられるようになり、やがて一方の考え方がなくなり、一つの見方として統一されていくのである。

こうして構成主義の考えは、学習過程を学習者のスキーマと学習環境の特性との相互作用とし、どんな教授プログラムであっても、学習は学習者の前概念や認識の枠組みなどによって左

右されるとするため、前概念を学習者の既存のスキーマとして学習過程の中心に位置づけ、前概念を科学的概念の前提として認めながらも克服の対象とするのである。

### 1. 3 構成主義に基づく授業のモデル

構成主義的な考えは、「子供たちにとっての新しい考え方は、彼らの記憶にある考え方を用いて、入力された感覚情報に意味が生成されるという過程を通してのみ構成される」<sup>(8)</sup>という仮定を前提とする。オズボーンら(1985)はこの仮定は「理科学習(これに相当する英語はない。科学の学習と訳すべきだろう：筆者)においては子供たちの科学が支配的な役割をするということの意味する」とみなしている<sup>(9)</sup>これはとりもなおさず、学習者は教師によってみたまされる白紙の状態ではないし、学習内容について学習者が授業以前から保持しているある種の考えは教師によって簡単には別の考えに置き換えられないことを示唆している。したがって、「主題の構造だけに基づいて教えても、前概念が大学レベルまで残りうるばかりか、学校での知識も日常の知識と分離されてしまい、学校タイプの問題や試験問題に答えるときにだけ使われるようになるものとして、生徒たちの前概念を理解することが生徒たちにあった教育を可能にする唯一ではないが一つの方法である」<sup>(10)</sup>といえるのである。

構成主義に基づく授業は、こうした前概念の把握を基礎として、前概念から科学的概念への概念変換としてとらえられている。ホワイト(R. T. White 1990)は、古い考え方(=前概念：筆者)が新しいもの(=科学的概念：筆者)に変えられるのに必要な条件とは学習者が既有的の考え方に不満を示さなければならぬことであるとして、科学の授業では古い考え方が新しいものに適さない矛盾した現象であることを明確に示してやるが必要であると述べている<sup>(11)</sup>オズボーンら(1985)は、このような授業の前提条件として次のようなことを指摘し、構成主義的見解に基づく授業モデル(表1)を提唱している<sup>(12)</sup>

- (1)生徒たちに概念がつくられる脈絡をできれば日常生活のなかで探索させるための機会を与えること。
- (2)授業の初期の段階において学習者に自分自身の考え方を明確化させること。
- (3)生徒たちに自分自身の考え方についての賛否両論をお互いが議論できるような機会をもたせること。

これらの前提条件は、レナー、カープラス、ナスバウムとノビック及びエリクソンら他の構成主義者たちの授業モデルの枠組み<sup>(13)</sup>とも共通する。すなわち、これらの授業の特徴は(1)生徒たちに自分の概念を明確にする機会や概念を解明し変更する機会を与えること(2)生徒たちの現

表1 構成主義的見解に基づく授業のモデル

授業の段階	教師の活動	生徒の活動
予備	生徒の考え方を調べ、それらを類型化する。 専門科学における考え方を明らかにする。 科学史からみた、その考え方の変遷を明らかにする。 授業において、生徒に明確化させるべき考え方とそうでないものを区別する。	これから学習すべき内容に対して、抱いていた自分の考え方を明確化する。

授業の段階	教師の活動	生徒の活動
焦点化	<p>学習の流れを明らかにする。 学習の動機づけとなるべき経験を与える。</p> <p>オープンエンドな問いかけをし、学習課題に対して生徒一人ひとりに多様な観点から考えさせる。 生徒が指摘した事柄を整理する。</p> <p>生徒達の考え方を、解釈し説明する。</p>	<p>学習において、用いられる教材に慣れる。</p> <p>実験観察した事象に対して、多様な観点から考えたり、疑問を持つ。</p> <p>実験観察事象から気がついた事柄を、記述する。 実験観察事象についての自分の考えをまとめる。 自分の考えを、討議や演示を通じて実験グループやクラス全体に発表する。</p>
挑戦	<p>生徒間の考え方の交換を促す。クラスの一人ひとりの考え方が考慮される場を保障する。 討議をオープンにする。 必要があれば、演示方法を示唆する。</p> <p>専門科学からの考え方を提起する。 生徒達の考え方が、仮説的な性格を有するものであることを認める。</p>	<p>長所と短所を見つけながら、クラスの他の者の考え方を考慮する。</p> <p>各々の考え方の有効性を証拠を挙げて検証する。 クラスの討議の中で出てきた考え方と専門科学の考え方を比較する。</p>
応用	<p>専門科学の考え方をを用いると学習課題が、単純に、適切に解決できることを示唆する。 専門科学の考え方（科学概念）を説明し、その課題解決に対する有効性を示す。 生徒が言語を用いて課題に対する解決策を述べるができるようにする。 生徒の討議に加わり、彼らの討議が解決策へ向かえるように適切な示唆を与える。 今までの課題よりさらに高度な問題を提起し、それに取り組めるよう授助する。</p>	<p>科学概念を用いて、実際に課題解決を図る。 クラスの他の者に対して解決策を提起する。 提起された多様な解決策を熟考して、それらを批判的に評価する。</p> <p>得られた解決策から、次の段階において取り組むべき問題を類推する。</p>

在の考え方と対立する体験を与えること(3)新しい考え方を導入してそれを一連の状況で使用する機会をつくることの三つに要約される<sup>(14)</sup>のである。では、このような視点から具体的な教育内容を構成するならば、どんなものになるのだろうか。構成主義に基づく科学的概念形成論がもっとも具体的に展開されていると思われる熱と温度の領域について、日本における優れた科学教育研究の理論や実践と比較しながら、検討してみよう。

## 2 熱と温度に関する概念形成の比較検討

### 2.1 子供たちの前概念

温度は物体内の分子の運動エネルギーの平均値に対応する物理量すなわち状態量であるのに対し、熱は温度の異なる二つ以上の物体の接触によって生じる温度の高い物体から低い物体へのエネルギーの移動量といえる。しかし、アメリカのエリクソン(G. Erickson 1985)によれば、子供たちはこれらを以下のように考えている<sup>(15)</sup>

子供たちは、8、9歳以上になると、熱をある物体の熱さの状態を表すものとして認識する。中学生までの生徒たちの大部分は、熱が温度の高いものから低いものへと移動することに気づいているが、熱を物質として考えたり、熱や物質の強弱によって熱の移動を説明する。温度については、12歳くらいの子供でも、温度を物体の周りの媒質の温度よりその物体の本性に基づいて判断するため、同じ部屋にある物体でも材質が違えば温度も違うと判断する。また12歳の生徒の50%は、大きな氷の方が小さな氷より温度が低いと考えたり、温度変化の問題では温度を外延量として扱う傾向がある。12~15歳の子供たちの多くは沸騰水の温度が100℃に保たれているのはホットプレートのスイッチの目盛りが変わらないからだと思っており、もしこの目盛りが強いほうへ移動したなら、6年生の80%、9年生の54%は沸騰水の温度も上昇すると予想している。

上記の温度に関する前概念は次の三つにまとめられる。(1)同じ部屋にある物体でも材質が違えば温度も異なる。(2)物体の温度はその物体の大きさに関係する。(3)火の強さを大きくすれば沸騰水の温度も100℃をこえる。

エリクソン(G. Erickson 1985)はこれらを科学的な概念へと変換する教育内容については何ら言及していないが、上述の前概念(2)と(3)は、たとえば仮説実験授業の『温度と沸とう』では問題1~3によって克服されたものと考えられる。問題1は、水の入ったフラスコを火で熱すると温度はどこまで上がるかを問うもので、それに対する予想選択肢が用意されている。ある小学校の授業記録では100℃以上という予想が全体の74%を占めていた<sup>(16)</sup>これは上記の前概念(3)に相当する。問題2は細火で静かに煮え立っている湯と太火でぐらぐら煮え立っている湯の温度を比べたらどちらが高いかというものであり、同じ授業記録によれば生徒たちの予想は「太火の方が高い」と「両方変わらない」とがちょうど半々に分かれ、「細火で静かに」を選んだ者はわずかに一人しかいなかった。これは前概念(3)が、問題1の実験結果や問題2の予想→討論によって、水の沸点は100℃であるという科学的な概念に変化しつつあることを示しているものと考えられる<sup>(17)</sup>問題3は、二つの入れ物の一方には少しの水を入れ、もう一方にはその10倍以上の水を入れてそれぞれ煮え立つまで熱すると、どちらの温度が高くなるかを問うものである。これは前概念(2)への挑戦と見ることもできる。生徒たちの予想では、湯の少ない方の温度が高いという答を選んだ者が9%いたものの、残りはすべて両方とも同じ温度であるという正解を選んでいる。生徒たちの討論の記録<sup>(18)</sup>から、ここではすでに問題1、2を通して水の沸点は火の強さや水の量に関係なく一定であるという科学的な概念が形成されているため、直観的意见は少なくなっていることがわかる。同じ授業を別の小学校で行なってもほぼ同様の結果が報告されている<sup>(19)</sup>こうして直観的な考えすなわち前概念(2)と(3)は、一連の問題群とそれに対する予想→討論→実験という過程を経て、科学的な概念へと変換されたといえるのである。

エリクソン(G. Erickson 1985)はまた、先述のような子供たちの前概念の分析から、相変化

が起こっているときには物質の温度が一定であることを子供たちに理解させるためには分子レベルの説明が必要であり、現に多くの教科書ではこれを分子運動説によって説明しているにもかかわらず、大部分の生徒たちは理解していないとして、相変化を何らかの物質論に関係づけることの必要性を主張している<sup>(20)</sup>。これは12歳のある生徒が細胞や風船の膨張には限度があることから水の沸点にも限界があることを説明した例を引用しての発言である。しかし、こうしたアナロジーより分子レベルの説明に基づいて相変化を本質的に理解させる教育内容を考えた方が適当だと思われる。実際、仮説実験授業『三態変化』では分子レベルの説明が貫かれており、生徒たちの大部分がこの授業を楽しくてわかりやすいと評価している<sup>(21)</sup> さらにエリクソン (G. Erickson 1985) は温度の内包量的側面に注目して開発された対立誘導法 (conflict inducing strategy) が小学校4年生の生徒たちに熱と温度の概念を区別させるのに成功したと述べている<sup>(22)</sup> が、このことについては2. 3で詳しく検討したい。

## 2. 2 授業による概念の発達

フランスのティベルジャン (A. Tiberghien 1985) によれば、生徒たちは「物体が熱せられると、その温度が上がる」という因果関係を体系的に把握せず、加熱による温度上昇を物質の属性と受けとめ、加熱して温度の上からない物質もあると考える<sup>(23)</sup>。これと同じようなことはたとえば仮説実験授業の『三態変化』でも随所に見られる<sup>(24)</sup>。しかし、ティベルジャン (A. Tiberghien 1985) が前概念の抽出・解釈に終始しているのに対し、仮説実験授業は具体的な教育内容によってそれらを科学的概念へと変換させている。

『三態変化』では、固体のナフタリン (問題1)、気体状態のナフタリン (問題3)、鉄や銅などの金属 (問題4)、ガラスや食塩やふつうの石 (問題5) というように、いろいろな物質を取り上げて、それらを熱したらどうなるかという問題をくり返し生徒たちに予想・討論・実験させ、どんな物質でも熱せられると液体や気体になるという科学的概念の形成を試みている。なお、問題2は、液体状態のナフタリンをさめるままにしておいたらどうなるかと問うことから、相変化の可逆性を理解させるものである。その結果、問題を解るにつれて、生徒たちの前概念は少しずつ科学的な概念へと変換されている。問題1では、液体にならずに気体になるという前概念の選択者が56%、液体や気体になるという科学的概念の選択者が42%であるのに対し、問題4では液体にはなるが気体にはならないという前概念と液体にも気体にもなるという科学的概念の支持とがほぼ半々に分かれ、問題5では前者が22%後者が76%となり、ついに前概念と科学的概念の比率が逆転しているのである。

またティベルジャン (A. Tiberghien 1985) は、授業を受ける前の生徒たちの熱概念に関する解釈の特徴を記述し、それが熱概念の授業の後、どのように変化したかということについて、生徒たちの解釈を(1)余り変化が見られない場合(2)かなりの発達が見られたがなお大きな困難を伴う場合(3)物理学者のものに近づく場合という三つのカテゴリーに分けて説明しているが、これらのカテゴリーと教育内容との関わりについて分析していないため、熱に関する科学的な概念を形成するための教育内容の構成に対しては次のような示唆にとどまっている<sup>(25)</sup>

### (a) 授業の目標

- (1) 実験場面を記述しなおすために温度パラメーターを使う。
- (2) 長い間接触していた二つ以上の物体は熱平衡にいたるという原理を使う。
- (3) 温度は物体の物理状態を決定するパラメーターの一つであることを知る。

(4)状態変化の温度の適用範囲と熱せられたときの温度上昇の適用範囲を学ぶ。

(b) 授業の工夫

(1)非常に異なる物質を熱したり、冷やしたりするさまざまな実験。

(2)沸騰水、融ける氷や他の状態変化に関して温度を読むことも含めたいいくつかの活動。

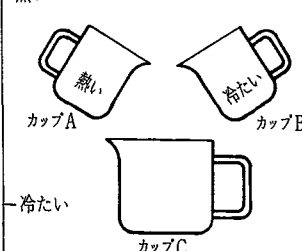
(3)生徒たちが教えられた概念を一般化できるようにするための議論やテスト。

問題はこのような授業に関わる教育内容をどのように構成するかということである。つまり、熱と温度に関する科学的概念を形成するためにはどのような内容と方法で授業をすればよいのかということが問題なのである。しかしながら、ティベルジャン (A. Tiberghien 1985) もエリクソン (G. Erickson 1985) 同様この問題に答えているとはいえない。

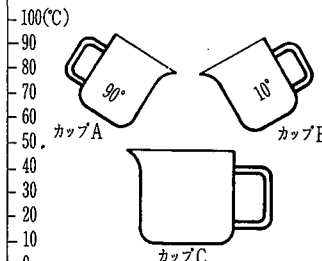
### 2.3 対立誘導法

このカリキュラムは小学校4年生に温度概念を理解させるための教授プログラムとしてイスラエルの研究者たちによって開発されたものである(R. Stavy, B. Berkovitz 1980)<sup>(26)</sup>。その研究の概観は以下のようにまとめられる。

最初のカリキュラムは温度概念に関わる直接かつ具体的経験そのものが子供たちの温度概念の認知的発達(cognitive development)に寄与するという前提に基づいて開発された。しかし、そのカリキュラムの効果が実証されないため、子供たちの温度概念の認知的発達に関する研究がさらにすすめられ、その結果、子供たちの多くは言語的(直観的)と数字的(科学的)な表し方について矛盾した判断をしていることが明らかになった。たとえば、「冷たい水と冷たい水を加えても冷たい水のままだ」と答える生徒が「10℃と10℃の水を一緒にすると20℃になる」と答える。このことは個人的経験や直観に基づく温度の言語的な表し方と温度をはかるときにつかわれる数字的な表し方との間に対立があることを示している。つまり、子供たちはこれら二つの表し方が同じ現象の異なる側面を記述していることを理解できないのである。こうして認知的対立(cognitive conflict)をつくり出す問題群からなる新たなカリキュラムが開発された。それは図2のようなワークシートに基づくものであり、その検証として二つの異なるタイプの実験授業が行なわれた。一つはクラス単位の授業、もう一つは個人指導による授業である。前者では同じ現象に関する言語的な問題と数字的な問題を何題も解かせてそれらが同じ現象を表していることを認識させる。もしそれらの答が対立するならば、どちらが正しいかを判断させ、実験によってそれを立証させる。後者においては、研究者が生徒のとなりに座り、前者と同じことを個人的に理解させるが、実験は行なわない。その後、これらの生徒たちとまったく

<p>熱い</p>  <p>冷たい</p>	<p><b>問題1</b></p> <p>テーブルの上に三つのカップがあります。カップAの中には熱い水、カップBには冷たい水が入っていますが、それらより大きいカップCはからっぽです。お母さんがカップAの熱いお湯とカップBの冷たい水をカップCに加えて、それらを混ぜました。</p> <p>さて、そのときカップCの水の熱さはどうなると思いますか。それに相当する点を左の線上に示しなさい。</p>
--	---

**問題 2**



テーブルの上に三つのカップがあります。そのうちカップ C はからっぽです。カップ A の水の温度は 90℃、カップ B の水は 10℃です。お母さんが二つのカップの水をカップ C に入れて、それらを混ぜました。

さて、カップ C の温度は何度だと思いますか。その温度を温度計の上に示しなさい。

**問題 3**

問題 1 と 2 はどこが同じでどこが違うでしょうか。これらの質問に対するあなたの答は同じですか、それとも違いますか。

問題 1 の線につけた印と問題 2 の温度計の上につけた印のところでそれぞれのワークシートを折り曲げて、それらの位置をくらべなさい。

問題 1 と 2 に対する正しい答は何だと思いますか。

**問題 4**

このような冷たい水と熱い水を混ぜる実験をしなさい。一つのカップを冷たい水でみたくしてその温度をはかり、別のカップに同量の熱い水を入れて、その温度をはかりなさい。この実験は問題 1, 2, 3 と何が同じですか。

図 2 ワークシートの一部

表 2 実験群と統制群におけるプレテストとポストテストの正答率

グループ	テスト	同じ温度の 分割・混合		違う温度の水の 分割・混合	
		言語的	数字的	言語的	数字的
クラス単位の 授業 (N=25)	プレテスト	60.0	20.0	92.0	4.0
	ポストテスト I	—	48.0	—	48.0
	ポストテスト II	80.0	76.0	100.0	40.0
個人指導による 授業 (N=26)	プレテスト	76.9	26.9	100.0	3.8
	ポストテスト I	—	61.5	—	26.9
	ポストテスト II	88.4	69.2	100.0	30.7
統制群 (N=26)	プレテスト	80.7	34.6	92.3	3.8
	ポストテスト I	—	30.7	—	11.6
	ポストテスト II	73.4	42.7	96.1	11.6

注) ポストテスト I は、実験群にはいずれも授業終了後、統制群にはプレテスト直後に行なわれた。ポストテスト II は、プレテストとポストテスト I のすべての問題からなり、ポストテスト I の実施後一ヵ月を経てから行なわれた。

指導を受けていない同じ学年の生徒たちとに対して、プレテストとポストテスト<sup>(27)</sup>を実施した結果、実験群の生徒たちにはその間に大きな進歩が見られたが、統制群の生徒たちには何の変化も見られなかった(表2)。対立による訓練(training by conflict)はいずれの場合も子供たちの温度概念の理解を促進させたのである。このことから、このような対立訓練(conflict training)は、温度概念のある側面に関しては子供たちの直観的知識がある年齢に達すれば正しく、子供たちに温度を数的に表すときにはそれらを使うようにすることができるという事実を利用することの正当性を証明したといえる。

こうしてイスラエルのステイヴィとベルコビッツ(R. Stavy, B. Berkovitz 1980)は、従来の科学教育が子供の直観的知識を無視してきたため、子供たちに物理法則を理解させることができなかつたとして、温度のみならず他の概念についても子供たちの認知的発達パターン(cognitive development patterns)に関する知識を使えば、効果的なカリキュラムを開発できると主張している。しかし、先述のカリキュラムでは、生徒たちは、温度を内包量として形式的に理解できたとしても、温度の本質をとらえられたかどうかは疑問である。ましてやエリクソンのようにこれによって生徒たちに熱と温度の概念を区別させることができたとはいえない。熱と温度の本質を生徒たちに理解させるためには子供たちの前概念のみならず熱力学体系全体を視野に入れて教育内容を構成しなければならないからである。北海道大学教育方法学研究グループの授業書「熱力学」<sup>(28)</sup>はこのような視点からつくられたものである。それを概観しながら、とりわけ熱と温度の概念がどのように扱われているか見てみよう。

授業書「熱力学」は、熱力学におけるもっとも一般的・基本的な概念や法則を抽出し、すべての生徒に理解可能な順序ともいべき構成原理によって、それらを統合し、構成するという過程を経て、熱力学を教育内容として再構成したものである。古典熱力学と不可逆過程の熱力学における論理構造及びそれらの科学史についての分析の結果、熱力学においては第0法則、第1法則、第2法則の三つの法則がもっとも基本的な法則として抽出され、これら三つの法則に対応する基本概念として温度、内部エネルギー、エントロピーの物理量が承認された。これらを教授するための基本視点としては(1)永久機関不能の原理及び諸現象の相互転化についての認識を媒介としてエネルギーの相互転化と保存の法則を導入すること(2)熱力学の出発点としてブラウン運動及びゆらぎを位置づけること(3)ミクロのエネルギーをマクロのエネルギーに集中させる条件が温度差にあることを強調することの3点が指定された。こうして授業書「熱力学」は1部「諸現象の相互転化とエネルギー則」と2部「エネルギーの散逸と集中」から構成されるようになったのである。前者は、序論にあたる部分であり、自然界全体にわたって諸現象がさまざまな形で相互に転化しあい、その過程においてエネルギーが保存されるという認識の形成を目標とした。後者は、本論部分であり、ブラウン運動から出発しながら、自然界にはミクロとマクロの階層が存在し、各々の階層に独自の運動形態が発現すること、さらにそれらの階層間でのエネルギーの転化を扱う原理として熱力学第1法則と第2法則が存在するという認識の獲得を目標とした。実験授業の結果、生徒たちの直観的考えを前提として、ブラウン運動の考察や熱素説と熱=運動論との対立から原子(分子)運動の励起=温度上昇というイメージを形成し、二つの散逸過程すなわち拡散・熱伝導から熱平衡の概念を理解させ、比熱概念の導入によって熱と温度の概念形成に成果をあげたのである。授業書「熱力学」はさしあたり高校生用の教授プログラムではあるが、小学生用のプログラムもこのような基本的視点から構成されなければならないものと思われる。

### 3 ま と め

教育内容方法の研究は、認識主体と認識対象との相互作用を明らかにすることによって、すべての生徒に理解可能な教授プランを確定することにあるものと考えられる。しかし、構成主義に基づく科学的概念形成論は、小論で検討した温度と熱以外の領域についても子供たちの前概念や認識過程を詳しく分析してはいるものの、教授プランを未だ明示しえていない<sup>(29)-(33)</sup>。それに対して、仮説実験授業では、科学上のもっとも基本的な概念や原理的な法則を教えるために、子供たちは白紙ではないという前提に基づき子供たちの間違いやすい問題からはじめてすべての子供が正答しうるように問題を配列すること(難しい方から易しい方に行くこと)<sup>(34)</sup>によって授業書が構成され、問題毎に予想→討論→実験をくり返すことによって授業が運営されている。つまり、仮説実験授業とは、「科学上のすでに確立している理論や法則も生徒たちの先入観や常識的な直観と相並ぶ一つの仮説として導入され、科学の理論や法則が常識的な直観よりはるかに正確で有効なものであることを身をもって追体験させるよう」<sup>(35)</sup>に計画された授業である。そこにおいては、科学的な認識とは対象に対する目的意識的な問いかけであるとともに社会的な認識でもあるという二つの原理がそれぞれ授業における実験と討論として位置づけられ、子供たちの主体性が活動的な文脈のなかで最大限保障されているため、どこで誰がやってもすべての子供に科学的概念を形成する授業が再現されるのである。一方、北海道大学教育方法学研究グループは、認識対象の客観的論理構造と認識主体の概念形成における法則性とを統一したものを「すべての生徒に理解可能な順序」<sup>(36)</sup>という原理として仮説的に設定し、この原理に基づく授業書を実験授業にかけることによってその原理を検証し、すべての子供に科学的概念を形成する授業の研究に取り組んでいる。こうした日本の教育内容方法研究は、認識対象の客観的論理構造を徹底的に分析するとともに、子供たちの前概念を科学的概念との関わりにおいて授業書に取り込み、すべての子供に科学的概念を形成する問題群によって、前概念を科学的概念へと変換させてきたのである。

このような視点から、現段階における構成主義に基づく科学的概念形成論に対する評価を整理すると、およそ次のように総括することができる。

「授業における生徒の認識過程は、生徒が教材に働きかけて教材が担う教育内容の本質を反映する過程(傍点=筆者)と、この反映過程を支える教師と生徒及び生徒同士の対話、討論を行なう相互作用の過程の統一として進行する」<sup>(37)</sup>ため、生徒たちの科学的概念形成の法則性は、教育内容を構成し、それを授業で教えてみてはじめて明らかになるものである<sup>(38)</sup>。しかしながら、構成主義に基づく概念形成論は、小論で規定したように、「知識は外部から与えられたものが内面化されるのではない」ことを前提とするため、生徒たちの前概念及び認識過程の抽出や解釈にとどまり、それらと教育内容方法との深い関わりをとらえる視点を欠いている。すなわち、「教科あるいは一つ概念でさえも、その理解にとって本質的である知識の中心的核が存在しない」<sup>(39)</sup>として、認識対象への分析視点を客観的に確立せず、認識対象の構造とは無関係に認識主体の前概念や認識過程だけを取り出しているのである。したがって、構成主義に基づく概念形成論は、教師に教師と生徒たちの認識のズレを意識させるという意味においては一定の示唆を与えるものの、科学的概念を形成する具体的な教授プランをつくり出すことは困難であるものと思われる。

註

- (1) 佐伯卓也「数学教育の理論的研究動向と実践的研究の関係—構成主義, メタ認知そして協力学習」岩手大学教育学部研究年報, 50(1): 125, 1990
- (2) Driver, R., *The Pupil as Scientist?*, Open University Press, 1983, 2-5
- (3) 村山 功, 宮下孝広「科学における問題解決と理解」岩波講座 教育の方法 6, 岩波書店, 1987, 43-44
- (4) Driver, R.「物理カリキュラムの再構成」, 物理教育の動向 プロシーディングス I, 1986年物理教育国際会議, 3-4
- (5) Driver, R., *The Pupil as Scientist?*, 52-53
- (6) Osborne, R. and Freyberg, P., *Learning in Science*, Heinemann Publishers(NJ) Ltd., 1985 (邦訳) 森本信也, 堀 哲夫, 子供達はいかに科学理論を構成するか, 東洋館出版社, 1988, 126
- (7) 森本信也, 堀 哲夫訳, 同上書, 123-124
- (8)(9) 森本信也, 堀 哲夫訳, 同上書, 128
- (10) Driver, R. Guesne, E. and Tiberghien, A., *Children's Ideas in Science and the Learning of Science*, Driver, R. Guesne, E. and Tiberghien, A. (eds), *Children's Ideas in Science*, Open University Press, 1985, 6
- (11) White, R. T., *Learning Science*, Basil Blackwell Limited, 1988, (邦訳) 堀 哲夫, 森本信也, 子供達は理科をいかに学習し 教師はいかに教えるか, 東洋館出版社, 1990, 205
- (12) 森本信也, 堀 哲夫訳, 前掲書, 156-161
- (13) 森本信也, 堀 哲夫訳, 前掲書, 151-154 レナーは, 多くの伝統的な理科の授業が, 伝達, 伝達事項の確認, そして実践という単なる訓練過程であり, その限界は明白であるとして経験→解釈→推敲の三段階からなる授業モデルの確立の必要性を示唆した。カープラスは, 理科学習とは学習者が新しい推論パターンを形式する自己制御の過程であるべきだと考え, 探索・説明・応用の三つの局面からなる学習サイクルを提起した。ナスバウムとノビックの授業モデルにおいては, 概念学習は, 学習の認知的枠組みを明らかにし, 概念的葛藤を作り出し, そして認知的調節を促すことによって達成されるものと考えられている。エリクソンのモデルでは, 第一段階は学習者に直観的思考方を明らかにし, 第二段階は学習者に自分の考え方を再構成する必要に気づかせ, 第三段階で学習者に予期しなかった結果へ調整できるよう援助するというものである。
- (14) Driver, R.「物理カリキュラムの再構成」, 17-18
- (15) Erickson, G., *An Overview of Pupils' Ideas*, *Children's Ideas in Science*, 55-66
- (16) 三木好子「授業書〈温度と沸とう〉と授業記録」仮説実験授業研究第7集, ほるぷ出版, 1982, 190
- (17) 三木好子, 同上書, 192-195 討論における発言によって, 室君と伊山君は問題1の実験から, 中川君と後藤田君は問題2の討論から, それぞれ正解に到達したことがわかる。彼らの発言は以下の通り。室君(ウ)「ぼくは, 伊山君に反対ですけど, 太火の方がどんどん上がっていくんですけど, 前に実験したように, ガスパナーで100℃以上あがれへんかったので, 太火でもどんどんあげることはできないと思います。」伊山君(ア→ウ)「アからウに予想変更するんですけど, 理由はね, 室君がさっき言ったように, 前の実験で100℃以上あがらなかつたので, だいたい100℃まであたためたら上がらないから, 両方同じだと思う。」中川君(ア→ウ)「理由は, 伊山君がいったように, どんどん早く100℃までいくけど細火はゆっくりゆっくりで, 上がってからはいっしょだと思う。」後藤田君(ア→ウ)「中川君もいうたように100℃までしかあがへんから, 太火の方が早くいってまわっている。」こうして討論後アからウに変更したものが5人もいた。

なお、選択肢(ア)と(ウ)は次のようである。(ア)太火でぐらぐらにえたっている湯の方が、ずっと温度が高い。  
(ウ)ほとんど同じで、かわらない。

- (18) 三木好子, 同上書, 196-198
- (19) 井上静香「授業書〈温度と沸とう〉の授業記録」科学教育研究 8, ほるぷ出版, 1982, 149-161, 正答率は、問題 1 が 34%問題 2 が 43%問題 3 は 57%となり、ここでも次第に高くなる傾向がみられる。
- (20) Erickson, G., An Overview of Pupils' Ideas, Children's Ideas in Science., 64
- (21) 中井静夫「授業書〈三態変化〉と授業記録」仮説実験授業研究第 8 集, ほるぷ出版, 1982 168-170
- (22) Erickson, G., An Overview of Pupils' Ideas, 63
- (23) Tiberghien, A., The Development of Ideas with Teaching, Children's Ideas in Science., 70
- (24) 中井静夫, 前掲書, 1982, 121-134 たとえば, 問題 1 「ナフタリンを熱していったらどうなるか」に対する金子さんの意見「洋服ダンスの中などに入っているナフタリンは液体なんかならないので, この場合も液体にならず気体になると思ったので」や問題 3 「熱してとかしたナフタリンをもっと熱したらどうなるか」に対する川添君の意見「でも固体が蒸発するなんて聞いたことがない」あるいは問題 5 「ガラスや食塩や普通の石も, うんと高い温度ではとけて液体になったり, 気体になってしまうか」に対する南原君の意見「ぼくは石がとけているようなのを見たことがないのでウにしました。」などの意見が, ここでの前概念にあたる。

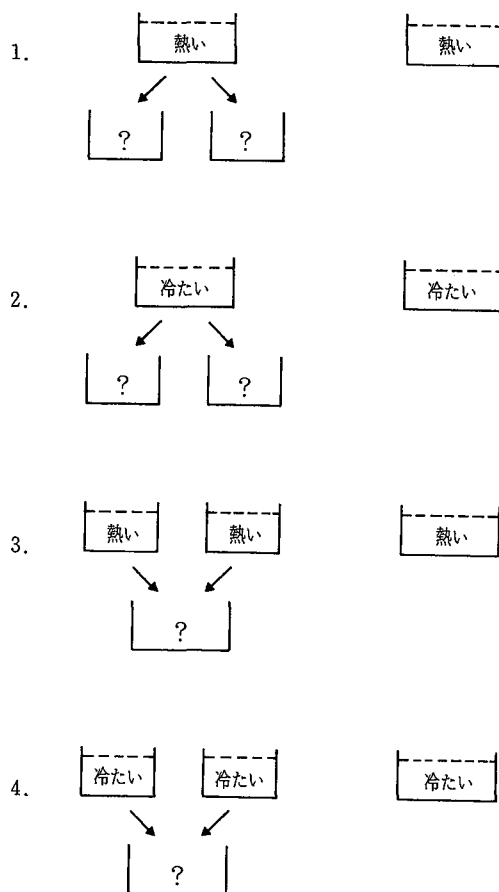


図3 同じ温度の水の分割あるいは混合による温度変化を言語的に表す問題

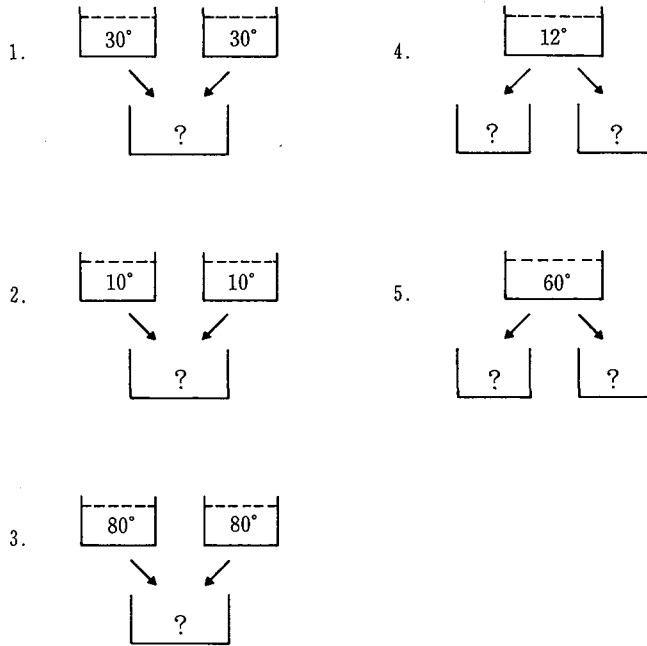


図4 同じ温度の水の分割あるいは混合による温度変化を数字的に表す問題

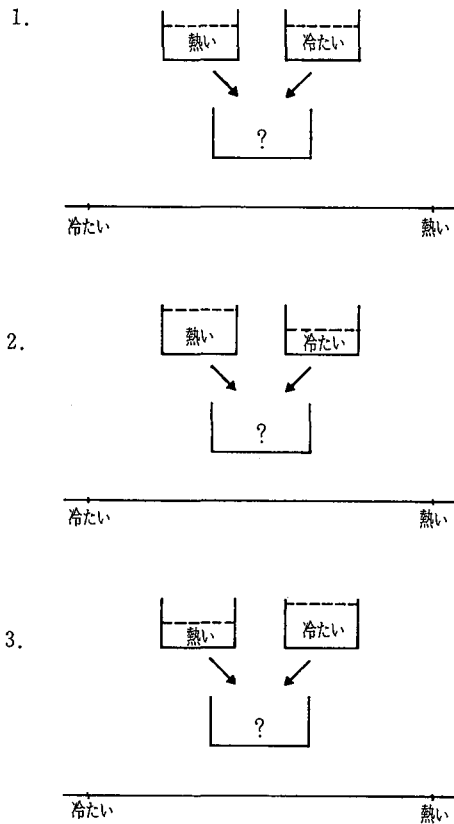


図5 違う温度の水の混合による温度変化を言語的に表す問題

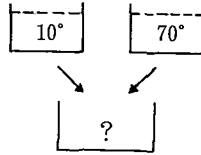


図6 違う温度の水の混合による温度変化を数字的に表す問題

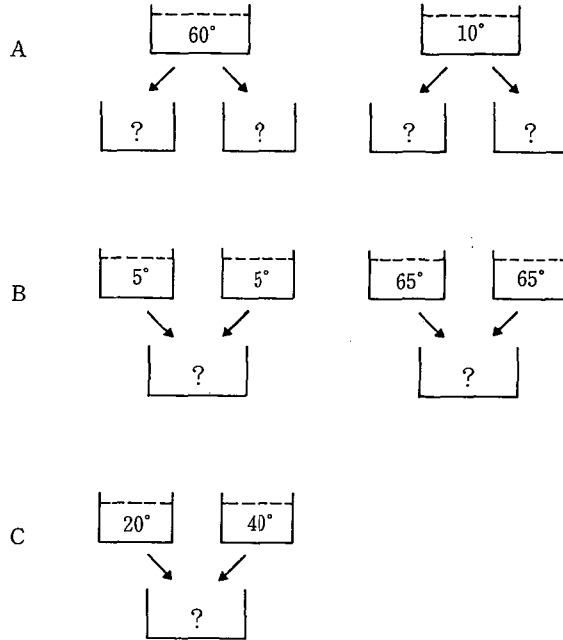


図7 (a) 同じ温度の水の分割による温度変化を数字的に表す問題  
 (b) 同じ温度の水の混合による温度変化を数字的に表す問題  
 (c) 違う温度の水の混合による温度変化を数字的に表す問題

- (25) Tiberghien, A., The Development of Ideas with Teaching, 76-83
- (26) Stavy, R. and Berkovitz, B., Science Education, 64(5) : 679-692, 1980
- (27) プレテスト (図3~6) とポストテスト I の問題例 (図7(a)~(c))
- (28) 高村泰雄 (編著), 物理教授法の研究, 北海道大学図書刊行会, 1987, 385-570
- (29) Gunstone, R. and Watts, M., Force and Motion., Children's Ideas in Science., 85-103
- (30) 森本信也, 堀 哲夫訳, 前掲書, 64-77
- (31) 森本信也「理科授業における学習者の Preconception の変容に関する一考察」日本理科教育学会研究紀要, 30(2) : 1-8, 1989
- (32) 村山 功, 宮下孝広「科学における問題解決と理解」岩波講座 教育の方法 6, 岩波書店, 1987, 42-74
- (33) 鈴木昭宏「認知・学習・教授」岩波講座 教育の方法 6, 岩波書店, 1987, 174-215
- (34) 板倉聖宣, 科学と教育, キリン館, 1990, 130-133
- (35) 高村泰雄 (編著), 前掲書, 15
- (36) 高村泰雄 (編著), 前掲書, 12
- (37) 高村泰雄 (編著), 前掲書, 6

- ⑧ 遠山 啓, 数学教育ノート, 国土社, 1991, 164 遠山氏は, 「元来人間の認識の発達には一定の法則があり, それは大局的には子供の認識の発達法則と符合するはずです。だから, この兩者(学問の系統と教育の系統)は深く関連しあっており, 教育の系統をたてるには, 何よりも学問の体系を考えてみなければなりません。まず大まかな体系は学問をもとにしてつくり, その上で子どもの理解力に照らしあわせて修正すべきでしょう。」(105-106頁)として, 「子どもになにかを教えて初めて, 発達段階を問題にすることができるのですね。子どもに教えてみないで, 子どもの発達段階がわかり, そのあとで何を教えるかを知らうというのは, たいへんな間違いですよ。」と述べている。科学的概念形成の法則性も何かを教えてはじめて問題にできるものと考えられる。
- ⑨ 堀 哲夫, 森本信也訳, 前掲書, 79