

理科授業におけるアナロジー思考の方法論的原理と
しての「変形」の導入：
小学校3年生の電気単元を事例にして

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-03-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 内ノ倉, 真吾 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00006490

理科授業におけるアナロジー思考の方法論的原理としての「変形」の導入

－小学校3年生の電気単元を事例にして－

“Transformation” as a Methodological Principle for Analogical Thinking in Science Teaching: A Case Study of the Third-Grade “Elementary Electric Circuit”

内ノ倉 真 吾

Shingo UCHINOKURA

（平成23年10月6日受理）

1. はじめに

アナロジーを基盤にした理科教授法については、教師が科学的な知識や教授学的な知識を駆使して、アナロジーやモデルを開発し、それらを子どもへと伝達することだけではなく、子ども自身がアナロジーやモデルを構成することも、強調されるようになってきている¹⁾。一方、最近の国際的な動向として、科学論的内容が理科カリキュラムの一構成要素として導入されるようになり、アナロジーやモデルの生成や活用を経験すること、それらの性質を学ぶことが、科学の認識論的な側面の理解を促進すると考えられている²⁾。このように、「科学を学ぶ」側面、「科学について学ぶ」側面のどちらに眼目を置くにせよ、子ども自身にアナロジーやモデルを生成・活用させていくことで、理科学習を展開していくことが、より一層重視されるようになってきているのである³⁾。

もちろん、これまでも子ども自身によるアナロジーやモデルの生成活動の導入が検討・実践されてきている。例えば、ウォンは、学習者によるアナロジーの生成活動によって、概念的な理解が深まることなどを実証的に明らかにしている⁴⁾。ただし、そのときのアナロジー思考とは、ターゲットとする事物・事象からのベースとなる事物・事象の「連想 (association)」による生成と、ターゲットとベースとを対応付ける「写像 (mapping)」による評価に実質的に限られている⁵⁾。

それに対して、クレメントによれば、熟達者のアナロジーの生成や評価の方法には、連想や写像以外にも、新たなベースを導入することによってアナロジーを評価する「橋渡し (bridging)」やターゲットとする事物・事象を部分的に変化させていく「変形 (transformation)」などの科学的な問題解決に重要な役割を果たす方法論的な原理がある⁶⁾。そのうち、「橋渡し」という認知プロセスは、垂直抗力の教授事例でブリッジングアナロジーとしてよく知られており、その実証的な有効性も認められている⁷⁾。その一方で、「変形」という認知プロセスは、アナロジーの生成や評価の双方で、重要であると考えられながらも、具体的な教授過程に導入することは試みられていない。

そこで本稿では、小学校3年生の電気単元を事例にして、アナロジー思考の方法論的な原理

である「変形」を導入した教授過程をデザインし、そこでの教授上の手立てとその認知的側面での学習効果を実証的に探ることにしたい。

2. 研究の対象と方法

(1) アナロジー思考の方法的原理としての「変形」の意味内容

物理学の熟達者の問題解決過程から、アナロジーの生成の認知プロセスを探ったクレメント(2008)は、アナロジーの生成の主要な様式が「連想」、「変形」であるとして、その特徴を以下のように指摘している⁸⁾。連想を経てアナロジーが生成される場合、着目している事物・事象Aとは、多くの意味では異なっているかもしれないが、共通する重要な特徴だけはもっていると認めうる事例Bが、記憶の中から思い出されるのである。それに対して、変形を経てアナロジーが生成される場合では、「元々の状況Aが修正され、それによって、以前は固定されていると仮定された、いくつかの特徴を変化させることによって、アナログ状況Bが作り出される」のである(図1)⁹⁾。

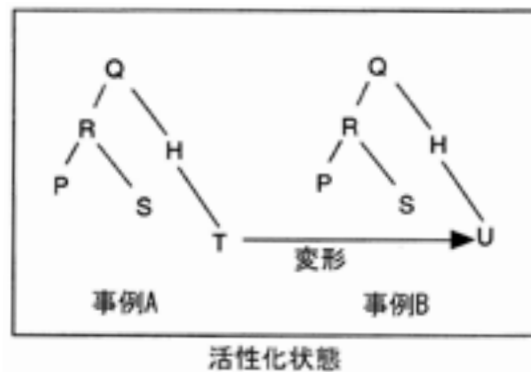


図1. 変形によるアナロジーの生成

変形によるアナロジーの生成・活用の具体的な事例は、「落下の法則」のような科学的な知識の発見だけではなく、科学の方法論を確立したとして歴史的な評価が高いガリレオ・ガリレイの運動論にも見ることができる。科学史家である高橋は、ガリレオの方法の秀逸性の一つとして、「天秤の釣り合い」から「斜面の運動」、そして、「振り子の運動」へといたるアナロジー的推論を基盤とした研究対象の拡張を指摘している¹⁰⁾。ライシスは、この三つの状況の間にアナロジーを認める認識プロセスとは、ある事例を別の事例へと変形していくものであった、と結論付けている。そして、最終的な事例は、先の事例を変形していき到達した「極限事例(extreme case)」といえるのである¹¹⁾。つまり、斜面での物体の運動は、振り子の極限事例として、水平面や鉛直方向での運動は、斜面での運動の極限事例として考えられるのである。

上述のような変形およびその一種である極限事例への移行という方法論的な原理については、アナロジー思考の範囲に留まらず、より一般的な認識の方法論的な原理であるとの指摘もある。例えば、「思考実験」概念の提唱者としても知られるマッハも、「思考実験」での重要な方法であるとしている¹²⁾。そして、この原理を「連続性の原理」と称し、「ある特別の場合に合う見解を得たなら、この場合の状況に関連のある限り思考の中で徐々に変様させる。そして、最初の場合に得られた見解を出来るだけ固持しようとする」ことと規定しているのである¹³⁾。

いずれにせよ、「変形」は、より一般的な認識の方法論的な原理としてより広範に検討して

いくに値する課題であるが、本稿では、その適用場面をアナロジーの生成・活用に限定して、議論を展開していくことにする¹⁴⁾。

(2) 単元選択の観点

アナロジーやモデルの必要性や重要性が意識され、中心的な教育内容領域として研究されている分野の一つとして、電気单元がある。例えば、イギリスの教科書を見れば、電気单元では、「科学を学ぶ」、「科学について学ぶ」、「科学を实践する」という多様な観点から、アナロジーやモデルが教授ストラテジーもしくは教材として活用されている¹⁵⁾。一方、平成20年改訂の小学校学習指導要領では、全学年で電気单元が設定されている。3年生では、育成・促進したい問題解決能力として「比較」が位置付けられている。「比較」は、2つ以上のものを比べるだけでなく、そこから両者の異同を考えるという意味合いをもち、類比もしくは対比するという側面も含んでいる。このような意味で、本稿で主題とするアナロジー思考と比較という認知プロセスとの関連性は深い。なお、6年生では、原因と結果の関係付け、事実から規則性の導出という因果的な推論、帰納的な推論という意味で「推論」が位置付けられているが、本稿では、上記に加えて、類推的な推論や演繹的な推論までも射程にしている。もちろん、これらの推論は、当該学年のみで育成・促進されるものでもない。以上のようなことから、小学校3年生の電気单元を具体的な事例として設定した。

(3) 調査の対象と方法

平成21年12月に静岡県内の国立大学教育学部附属A小学校、公立B小学校の3年生を対象にして、アナロジー思考の方法論的原理である「変形」を導入した閉回路概念の教授過程をデザインし、そこでの教授上の手立てとその実証的な有効性を調査した(表1)。

表1. 調査の対象と時期

群の分類	実験群		非実験群
	A小学校	B小学校	
学校	A小学校	B小学校	
学年	3年生		
クラス	1クラス	1クラス	1クラス
児童数	39名	23名	24名
調査時期	平成21年12月	平成21年12月	平成21年12月

A小学校1クラス(39名)とB小学校1クラス(23名)を対象にした授業(実験群)では、電気单元「豆電球にあかりをつけよう」の構成の中に、アナロジー思考の方法論的原理である「変形」を導入した試行的な授業を2時限分取り入れた(具体的な教授過程については、次章にて示す)。それ以外の部分は、单元全体での学習の流れに不自然な部分が生じないように再配置・再構成する程度に留めた(表2)。一方、B小学校1クラス(24名)を対象とする授業(非実験群)では、基本的に、当該学校で使用している教科書での单元構成にしたがって授業を実施した。いずれのクラスでも、当該クラスの担当教諭が授業を実施した。

実験群の児童62名については、第5・6時での授業中の学習活動の状況は、児童配布用の資料(いわゆる、授業プリント)、授業観察(ビデオおよびICレコーダーによる録音・録画を含む)

にて、授業後の理解状況は、ポストテスト（資料1）によって調査した。それに対して、非実験群の児童24名については、授業時間数の差異による影響を考慮して、同じく第6時終了時点で、同一のポストテストによる調査を実施し、実験群と比較した。

表2. 単元「豆電球に明かりをつけよう」の構成

特 徴	主たる学習の内容と活動
第1時	豆電球、乾電池、ソケットを使って、豆電球に明かりがつくつなぎ方とつかないつなぎ方を考える。
第2時	豆電球に明かりがつくつなぎ方を調べ、電気の通り道通り道が切れ目なく、一つの輪のようにつながっていることを理解する。
第3時	電気を通す物と通さない物を調べる道具（テスター）があることを知り、それを作成する。
第4時	テスターを使い、電気を通す物と通さない物とに分類し、電気を通す物は、金属であることを理解する。
第5時 (試行)	ソケットを使わず、豆電球、乾電池、導線2本で豆電球に明かりがつくつなぎ方を、豆電球をモデル化して考える。
第6時 (試行)	ソケットを使わず、豆電球、乾電池、導線1本で豆電球に明かりがつけられるかを、変形によるアナロジーから考える。
第7時 第8時	豆電球を使ったものづくりをする。 単元のまとめを行う。

3. アナロジー思考の方法的原理としての「変形」を導入した閉回路概念の教授過程とその手立て

(1) ソケットの有無と豆電球の点灯（第5時相当）

1) アナロジー思考を誘起する問題の提示

試行的な授業である第5時は、豆電球、乾電池、導線付きソケットを使って、豆電球に明かりがつくつなぎ方を復習するところから始めた。続いて、教師から導線付きソケットを使わずに、豆電球に明かりをつけるには、どのようにつなげたらよいかという学習の課題が提案された。多くの児童は、いろいろなつなぎ方を考えた上で、図2のようなつなぎ方にすれば、豆電球に明かりがつけられると予想するのであった¹⁶⁾。図3にも見られるように、このような考えは、ソケットを使用したときの接続法とのアナロジーに基づいた推論によるものといえよう¹⁷⁾。しかも、そのアナロジーを成立させるのは、見た目が似ているという表面的な類似性によるものであった。

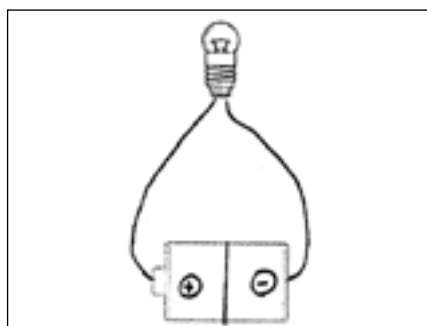


図2. 豆電球の底部への接続

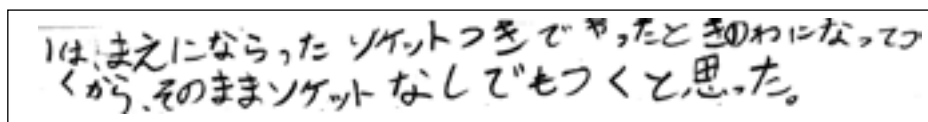


図3. 児童の表面的な類似性による推論

問題を解決しようとするときに、アナロジーを自発的に生成し、活用しようとする傾向は、熟達者と初心者のどちらにも共通するものである¹⁸⁾。言い換えれば、解決すべき問題との遭遇は、アナロジー思考の一つの契機になりうるのである。したがって、理科授業で解決すべき問題、しかも何らかの既存の知識を活用することで解決できそうな見通しをもった問題を提示することは、子どもにアナロジーを考えるように促すための一つの手立てとなるのである。

2) 予想と反する事象の提示と疑問の生起

解決すべき問題の提示によって、児童の多数が表面的なアナロジーを考え、適切ではないつながり方を考えさせることになるのであった。表面的な類似性は、アナロジーを導く手がかりとなるが、推論としてより重要となってくるのは、機能的・構造的な類似性である¹⁹⁾。したがって、表面的なアナロジーから機能的・構造的なアナロジーへと移行できることが重要となってくる。つまり、はじめから子どもが機能的・構造的なアナロジーを考えられるのではなく、生成・評価・修正していくという動的なプロセスが展開できることが重要なのである。

先の問題提示に続いて、教師は、多数の児童が選択した図2のつながり方のみについて、豆電球に明かりがつかないことを教師が演示にて示した。このとき、図2のつながり方を素朴に考えていた児童は、「あれ、つかない」などの声を上げ、疑問を生じることになった。これは、観察（実証）によるアナロジーの評価であるが、この疑問の生起は、回路の表面的な類似性から、豆電球の内部構造の考察を通じた、回路の等価性という機能的な類似性に着目する必然性を受け入れやすくすることがねらいとされていた。

3) 解決すべき問題としてのターゲットの変形

クラス全体として、ソケットを使った場合の接続方法との表面的なアナロジーでは、問題が解決され得ないことを認め、豆電球の内部構造に着目することになった。このとき、電気の通り道という観点から、豆電球のうち、直接的に関係しないと思われる部分を取り除き（捨象）（例えば、電気を通さない物としてのガラスの部分）、直接的に関係すると思われる部分を取り出す（抽象）（例えば、電気が流れて明かりがつくフィラメンの部分）、という認知的な操作が求められた。

こうした認知的な操作を経て、児童が解決すべき問題（ターゲット）は、「導線2本をどこに接続するのか」という問題から、「内部の導線2本はどこに接続しているのか」という問題へと変形されたのであった（図4）。言い換えれば、1つの輪のようにつながっているはずの導線のうち、一部が豆電球の胴体で覆われていて、その両端を探し当てる、というブラックボックス問題として読み替えられるのである。

このような問題状況の変形で、児童は、豆電球の内部構造を多様に考えることができ（図5）、クラス全体での議論を経たのちに、実際に点灯するかどうかを確かめることによって、自分自身で考えた豆電球のモデルを評価・修正することにもつながるのであった。

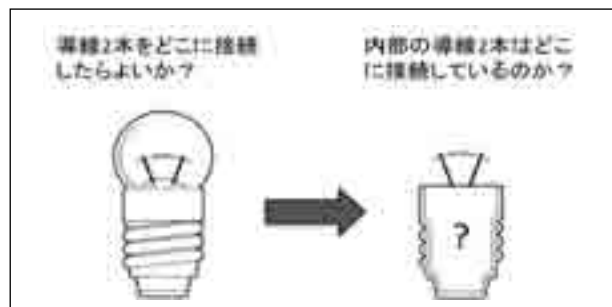


図4. 問題状況の変形

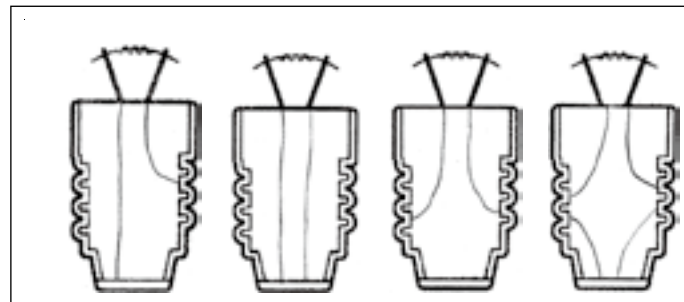


図5. 児童による豆電球の内部構造のモデル化

(2) 導線の数と豆電球の点灯 (第6時相当)

1) 既知の状況としてのベースの連続的変形

ソケットがなくても、豆電球、乾電池、導線2本を使って豆電球に明かりがつくことを学習した児童に対して、教師から「導線を1本にしても明かりがつけられるのか」という疑問が投げかけられた。これは、表面的な類似性を手がかりとすれば点灯しない回路であって、閉回路という機能的な等価性を手がかりとすれば点灯する回路の問題であった。この問題に対して、前時の豆電球の構造を基にしてつけられると考える児童と、導線が1本だと一つの輪のようにつなげられないからつかないと考える児童に、クラスの児童はほぼ二分されたのであった。

両者の考えをクラス全体で共有した後に、教師は、アナロジー思考の場面を設定し、導線2本の状態から導線1本の状態についての知見が得られるように、児童の考えを方向付けた。すなわち、導線を2本使った接続方法という既知の知識をベースとして、その一部の特性を変形（この場合は、1本の導線の長さ）していくことで、最終的には、導線を1本しか使わない状態であるターゲットへと到達する、という変形によるアナロジーの生成・活用である（図6）。

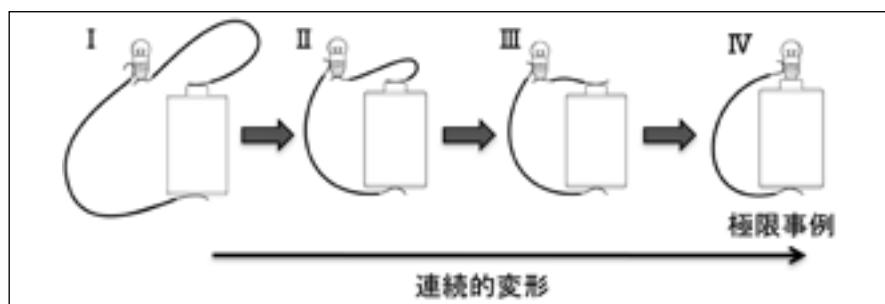


図6. 豆電球接続の連続的変形

2) 連続的変形での推論の流れ

上述の連続的な変形の過程では、単純にベースとターゲットとの類似性を考えているばかりではなく、起点となっているベースの知見が適用できる範囲を確定しようとしているという意味で、演繹的な側面ももっているのである²⁰⁾。

そこで、次のような推論の流れを想定した(図7)。図6のIのような接続で豆電球にあかりがつくこと(前提1)は、実際に確かめることで、信頼の置ける知識や経験となっている。また、導線の長さが豆電球の点灯には、およそ関係しそうなこと(前提2)は直感的にも認めうる。この二つの前提をひとたび認めてしまえば、図6のII、III、IVについても、豆電球に明かりがつくことを受け入れざるを得なくなる。



図7. 連続的変形での推論過程の構造化

具体的には、まず、導線2本のうち1本を任意に選び、それが半分の長さになった状態の図を描かせた。このときに、豆電球に明かりがつくかどうかを判断させた(図8中の「あかり」欄の丸印)。続いて、さらに半分の長さ(すなわち、4分の1)になった状態の図を描き、豆電球に明かりがつくかどうかを判断させる。そして、導線の長さが究極的に短くなったらどうなるであろうか、という発問によって、最終的には導線がなくなり、導線1本の状態へと到達するところへと導き、豆電球に明かりがつくかどうかを判断させるのである。この一連の過程を振り返ったときに、導線1本であっても豆電球に明かりがつくことが納得もしくは予想されるようになるのであった(図9)。豆電球の内部構造に関する知識を持ち出さなくても、導線2本の場合の接続方法を知っておくだけ、導線1本だけの接続方法を導き出せるのである。しかも、この変形の過程は、導線1本場合から2本の場合へと逆にもたどれ、適切性も保存されるという意味で、可逆的である。

この後、豆電球、乾電池、導線1本を使って明かりがつくことを実際に確かめたのであるが、この実験活動は、上述のような認識上の世界と経験的な世界とを関連付ける機能を果たしているのである。

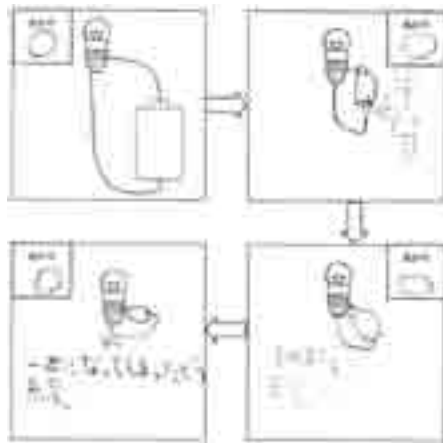


図8. 導線2本から導線1本への変形

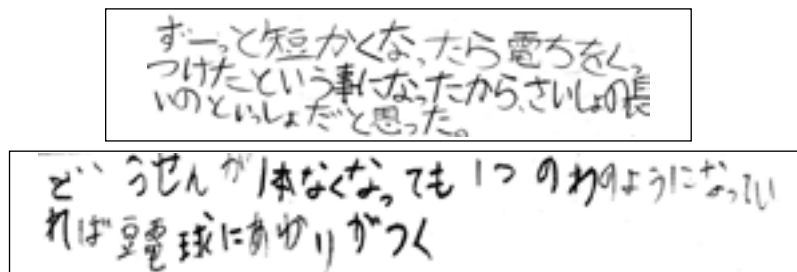


図9. 導線の変形を経た児童の認知状態

(3) 推論のための条件文表現とその機能的活用

アナロジー思考の方法論的な原理としての「変形」を導入した教授過程では、豆電球に明かりがつくための条件に焦点を当てているという意味で、推論するためのことばとして条件文表現が重要である。日本語における条件文の用法を詳細に探っている前田によると、「ならば」などの接続詞を用いる条件文は、一種の論理文であり、その条件文は、前件もしくは後件の事実性や用いる接続詞によって、仮説的、事実的、反事実的用法というように、多様な機能をもっているのである²¹⁾。

しかも、一般的に、条件文では、「PならばQ、QならばR、よって、PならばRである」というような推移律が成立する一方で、「PならばQである」という条件文から、「Pではないならば、Qではない」を導く、いわゆる、「誘導推論」を引き起こしやすいといわれている²²⁾。本稿の事例でいえば、「豆電球、乾電池、導線が1つの輪のようにつながっていなければ、豆電球に明かりはつかない」という推論を導きやすいのである。もちろん、この場合は適切なものであるが、言語スキルや推論スキルの育成という観点から見れば、必ずしも十分とはいえない面もある。

排中律を認めないような非標準的な体系では別であるが、標準的な体系では、条件文での論理関係は図10のようになる。先の誘導推論の事例は、「裏」に対応するものであり、真偽は常に一致するとは限らない。

それに対して、真偽が常に一致するのが「対偶」である。そこで、ことばの意味のみならず、推論の論理関係を示す構文も重視するという観点から、教師から児童への問いかけは、後件の否定である「Qではないならば」（具体的には、「豆電球に明かりがつかないならば」など）と

いう形式をできうる限り意識的に活用した。

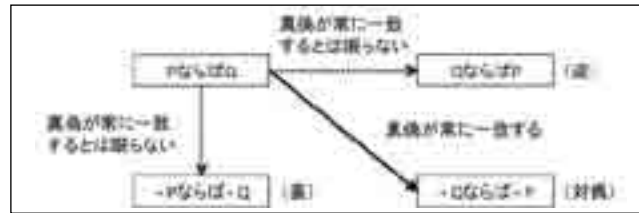


図10. 標準的な体系での論理関係

一方、子どもに条件文の形式にて問いかけることは、アナロジーやモデルの妥当性や適用範囲を考えさせる戦略でもある。大学生を対象にした化学授業を实践したカーンは、この戦略を次のように説明する。学生に、新奇な条件下で「もし～したらどうなるだろうか (what if)」と問いかけ、それに対して、学生は自分の考えるモデルのうちの1つもしくはそれ以上の変数を変化させていくことで、そのモデルの適用範囲を自覚し、修正するようになる、という²³⁾。本教授過程では、導線の長さを1つの変数として設定し、その変数を徐々に変化させていくというプロセスを経ている。加えて、回路を接続した状態で導線を短くすることは、ほとんど現実的にはできないという意味で、反事実的な状況であり、また、究極的に導線を短くして極限をとるという新奇な状況に向かっている。教師が「もし～したらどうなるだろうか」と問いかけ、それに即して児童が思考する、ということを繰り返すうちに、上述のような変形過程が組み込まれる。

このように本教授過程では、推論のためのことばとしての条件文表現（構文）については、論理関係の探索とモデルの変形過程の促進という機能に着目して、意識的に活用したのであった。

4. アナロジー思考の方法的原理「変形」を導入した閉回路概念の教授過程の効果

(1) ポストテストの評価の観点

第6時終了後に、実験群のA小学校1クラスとB小学校の1クラス、非実験群のB小学校の1クラスを対象として、共通のポストテスト（質問紙調査）を実施した。ポストテスト（資料1）は、選択式にて、電気を通すものと通さないもの（2問）、閉回路に必要な構成要素（2問）、閉回路になる接続方法（3問）、回路の等価性（1問）を問う問題と、記述式にて、豆電球点灯の条件（1問）、閉回路になる接続方法（1問）を問う問題から、構成した。

回答の適否の観点としては、選択式の問題（(1) ①～⑧、(3)）については、5件法の選択肢のうち該当する2つのいずれかを選んだ場合を正答とした。科学的な理解を問う問題について5件法を用いたのは、単純に選択肢の正否だけではなく、子ども達の自分自身の考えへの自信度を踏まえた回答の状況を探ることをねらいとしていた。問題（3）については、豆電球に明かりがつかないつなぎ方である④のみを選択した場合を正答とした。一方、記述式の問題（2）については、「豆電球に明かりがつかない」((2) ①)、「かん電池、豆電球、どう線が1つの輪のようにつながっていない」((2) ②) という記述に類似したものを正答とした。

(2) ポストテストの結果

ポストテストの平均点（問題項目ごとの重み付けをせず、各1点とした場合。実質的には、

平均正答数)、ならびに問題項目ごとの正答者数および正答率については、表3のとおりであった。これらのB小学校の結果に対しては、平均正答数(平均得点)については、 t 検定(有意水準 $\alpha = 0.05$ 、片側検定)を、各問題項目については、フィッシャーの直接確率法(有意水準 $\alpha = 0.05$ 、片側検定)を用い、実験群と非実験群の独立性の検定を行った。ただし、クラスの等質性を考慮して、同一学校内の2つのクラスのみを対象にして、統計的検定を行った。なお、この統計的検定における各種統計量は、統計ソフトR(R 2.10.1)を使用して算出した。

表3. ポストテストでの正答状況

	実 験 群		非実験群
	A小学校	B小学校	B小学校
(1) - ①	23 (59.0%)	16 (69.6%)	17 (70.8%)
(1) - ②	33 (84.6%)	22 (95.7%)	19 (79.2%)
(1) - ③	35 (89.7%)	19 (82.6%)	15 (62.5%)
(1) - ④	37 (94.9%)	20 (87.0%)	17 (70.8%)
(1) - ⑤	23 (59.0%)	16 (69.6%)	19 (79.2%)
(1) - ⑥	17 (43.6%)	13 (56.5%)	14 (58.3%)
(1) - ⑦	31 (79.5%)	15 (65.2%)	12 (50.0%)
(1) - ⑧	23 (59.0%)	10 (43.5%)	9 (37.5%)
(2)	26 (66.7%)	15 (65.2%)*	6 (25.0%)
(3)	28 (71.8%)	16 (69.6%)*	9 (37.5%)
平均点	7.05	7.04*	5.76

* $p < 0.05$

ポストテストの平均得点を見ると、B小学校の実験群が7.0点であり、非実験群が5.8点であり、両群の間には統計的な有意差 ($p < 0.05$) が認められたのであった。つまり、実験群の方が、非実験群に比べて科学的な知識の獲得が促進されたことがポストテストにて確認できたのであった。また、問題項目ごとに両群を比較した場合、実験群の方が正答率の高い問題が、10問中7問あった。特に、正答率が高かった問題は、豆電球内部の伝導性に関する問題((1) ②)と、ソケットの有無や導線の本数といった回路の構成要素と閉回路との関係に関する問題((1) ③、④)であった。ただし、選択式の問題のうち1問((3))を除いては、実験群と非実験群の正答者数の間には、統計的な有意差が確認されまでにはいたらなかった。一方、豆電球と電気の通り道の関係を記述する問題((2) ①②)と複数のつなぎ方の中から豆電球が点灯するものを選択する問題((3))については、統計的な有意差が認められたのであった(それぞれ $p < 0.05$)。このことは、A小学校と比較した場合であっても、同様の傾向が認められるのであった。以下では、特に有意差が求められた問題の性質や教授過程との関係について言及することにした。

(3) 閉回路概念の教授過程と学習成果の関係性

1) 豆電球点灯の条件の理解と論理的な推論の促進

豆電球と電気の通り道の関係を記述する問題((2) ①②)では、問題の設定状況というコン

テキストに即して、条件文という統語構造を活用することが求められていた。問題(2)①では、「かん電池、豆電球、どう線が1つの輪のようにつながっていれば」という前件に対して、豆電球の点灯の可否に関わる後件（「豆電球に明かりがつく」）を記述することが求められていた。問題(2)①は、非実験群の児童であっても22名(91.7%)が正答できていた。

一方、推論様式という観点から見れば、問題(2)②では、①の後件の否定（「豆電球に明かりがつくかない」）を前件とし、それに対応した後件、すなわち、①の前件の否定（「かん電池、豆電研究、どう線が1つの輪のようにつながっていない」）を記述することが求められていた。つまり、この問題(2)②とは、①に対する「対偶」の記述ができるかという問題として捉えられるのであった。

これについては、非実験群では、「明かりがつかない」というトートロジー的な回答、「こわれている」などの暗黙の前提（豆電球や乾電池が正常に機能している）を問題視する回答が見られた。閉回路になっていないことを意味するものであっても、「つながっていない」という記述に見られるように、具体的な問題点が明示されない（想定される回路の範囲が広い）回答が多かった（図11）。

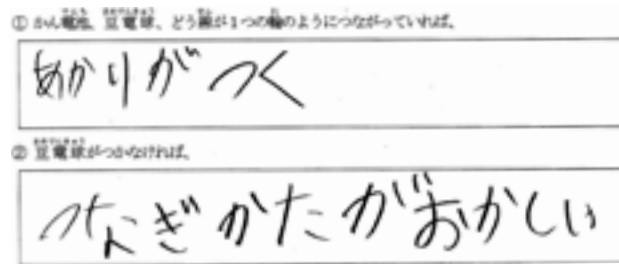


図11. 問題点が明示されない記述例

それに対して実験群では、「かん電池、豆電研究、どう線が1つの輪のようにつながっていない」という対偶に対応する記述が見られたのであった（図12）。

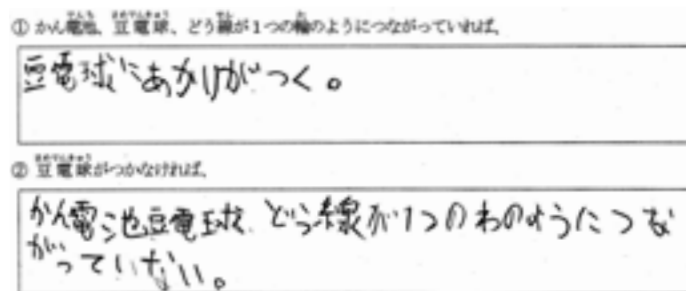


図12. 対偶関係に基づいた記述例

それ以外にも、閉回路になっていないことを踏まえた上で、豆電球に明かりがつくつなぎ方を記述した児童もいた。単純には言い切れないものの、実験群の教授過程では、少なくとも、豆電球の構造のモデル化や回路の変形についてのディスコースを通じて、「回路が1つの輪のようにつながっている」（命題P）、「豆電球に明かりがつく」（命題Q）、「豆電球の構造が〇〇のようになっている」（命題R）からなる複数の条件構造を活用した推論（例えば、 $R \rightarrow P$ 、 $P \rightarrow Q$ という推移律や $\neg Q \rightarrow \neg P$ という対偶などの演繹的推論）やその言語表現（条件文）を扱う機会が提供されていたことが背景にあるであろう。

2) 等価的な閉回路の理解と表象操作の促進

もう一つ統計的な有意差が認められた問題は、複数のつなぎ方の中から豆電球が点灯するものを選択する問題（(3)）であった。実験群、非実験群のいずれであっても、明かりがつかないものとして、豆電球の下部に導線2本を接続するつなぎ方（問題中の選択肢④）を選択することができていた（それぞれ18名（78.3%）と19名（79.2%）。図13）。

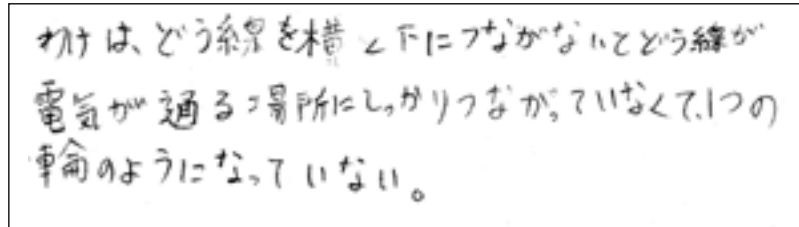


図13. 選択した理由の記述例

しかしながら、それ以外の適切ではないつなぎ方も回答として選んでいる児童の割合は、非実験群の方が高かったのである。例えば、導線2本がしかる場所に接続されているが、途中で立体的に交差しているつなぎ方（問題中の選択肢②）は、接続箇所に着目したり、表象（当該回路のモデル）を意識的に操作（変形）することができれば、適切なつなぎ方（問題中の選択肢①）と等価であることが導き出されるのである。その点、実験群の児童では、選択肢②を選んだ児童は、2名（8.7%）しかいなかったのであった。

いずれにせよ、選ぶべき選択肢が1つであるとは明示していない問題設定の中で、実験群の児童は、正答である選択肢のみを選ぶことができていたという意味で、学習した内容が定着したものと見なせるであろう。

5. おわりに

これまでアナロジーを基盤にした理科教授法の開発では、類似した事物・事象を記憶の中から呼び起こして関連付ける「連想」に比べて、それほど重視されることがなかった、認識対象である現象（ターゲット）を部分的に変容し、別の現象（ベース）へと到達する方法である「変形」と呼ばれるアナロジー思考の方法論的な原理であるに着目した。

本稿では、科学哲学、科学史、認知心理学などの関連分野での知見を基にして、当該原理とは、認識対象である現象を部分的に変容し、別の現象へと到達する方法であること、また、方法論的な要請として、連続的に変形することや極限事例まで変形することが含まれるもの、として概念規定した。

小学校3年生の電気単元を事例にして、アナロジー思考の方法論的な原理である「変形」を導入した教授過程をデザインし、そこでは以下のような教授上の手立てをとった。第一に、アナロジー思考を導入するために、子どもが既知の知識を活用して解決しようとする問題を設定した。第二に、ターゲットである問題状況、ベースである既知の状況のいずれもが、アナロジー思考での変形の対象となりうることを示した。第三に、連続的な変形での推論過程を構造化し、アナロジー的な推論ばかりではなく、演繹的な推論を同時に経る可能性を開いた。第四に、推論するためのことばとして条件文表現を重視し、論理関係の探索とモデルの変形過程の促進という機能に着目して、意識的に活用した。その結果、閉回路概念についての科学的な

理解が促進される一方で、対偶の条件文完成などに見る演繹的推論や表象操作のような推論スキルという点でも学習効果が認められたのであった。

なお、本稿の教授過程での学習効果の背景にありうると示唆される、児童はいかに教師のディスコースを専有 (appropriate) したのか、という言語論的な問題については、アナロジー思考の方法論的原理としての「変形」が適用可能なその他の校種・学年、内容領域の事例を踏まえて、今後検討することにした。

謝辞

浜松市立砂丘小学校の大石隆示校長、市川元久教諭、加藤陽介教諭、静岡大学教育学部附属浜松小学校の山崎保寿校長、袴田洋史教諭、浜松市教育委員会の竹本石樹指導主事には、本研究の授業実践の実施に関して、貴重な助言と多大な協力を賜った。ここに記して、感謝の意を表したい。

付記

本研究の一部は、科学研究費（課題番号21730691）の助成により行われたものである。

引用文献および註

- 1) Oliva, J. M. et al., "Teaching Models in the Use of Analogies as a Resource in the Science Classroom", *International Journal of Science Education*, 29 (15), pp.60-62, 2007.
- 2) Coll, R. K. et al., "The Role of Models/and Analogies in Science Education: Implications from Research", *International Journal of Science Education*, 27 (2), pp.183-198, 2005.
- 3) 構成主義的学習論が興隆してきた1980年代以降からおよそ30年間にわたる、アナロジーによる理科教授法の開発過程で検討されてきたことについては、すでに拙稿にてその詳細を報告している。拙稿、「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』、50 (3)、27-41頁、2010。
- 4) Wong, E.D., "Self-Generated Analogies as a Tool for Constructing and Evaluating Explanations of Scientific Phenomena", *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (4), pp.367-380, 1993.
- 5) 基本的に、教師がアナロジーを導入するときの手続きもほぼ同様である。例えば、Glynn, S. M., "Explaining Science Concepts: A Teaching-With-Analogies Model", in Glynn et al. (eds.), *The Psychology of Learning Science*, pp.230-237, 1991, Lawrence Erlbaum Associates (邦訳：稲垣成哲、「科学概念の説明：アナロジーによる教授モデル」、武村重和 (監訳)、『理科学習の心理学』、253-261頁、1993、東洋館出版)。
- 6) Clement, J., *Creative Model Construction in Scientists and Students*, pp.33-64, 2008, Springer.
- 7) Clement, J., "Using Bridging Analogies and Anchoring Intuitions to Deal with Student's Preconceptions in Physics", *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (10), pp.1241-1257, 1993.
- 8) Clement (2008), op.cit.6), pp.37-40. クレメントは、「連想」と「変形」以外にも、「原理

(principle)」を経てアナロジーが生成される場合があることを指摘しているが、エキスパートを対象とした調査から、主要なものではなかったと報告している。

- 9) Clement (2008), op.cit.6), p.38.
- 10) 高橋憲一、『ガリレオの迷宮－自然は数学の言語で書かれているか？－』、455-456頁、共立出版、2006。この天秤、斜面、振り子のアナロジーの具体的な分析は、同書の第3章を参照されたい。
- 11) Rasis, V., “Expansion and Justification of models: the Exemplary Case of Galileo Galilei”, in Magnani et al. (eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, pp.156-161, 1999, Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- 12) E.マッハ (著)、廣松渉 (編訳)、『認識の分析』、111頁、法政大学出版局、2002。
- 13) E.マッハ (著)、岩野秀明 (訳)、『マッハ力学史 上－古典力学の発展と批判－』、226頁、ちくま学芸文庫、2006。
- 14) なお、思考実験 (thought experimenting) は、シミュレーション的なモデリングの特殊な形式であり、アナロジー的モデリングと同じく、広くメンタルモデリングに含まれるとも考えられる。Nersessian, N.J., “The Cognitive Basis of Model-Based Reasoning in Science”, in Carruthers et al. (eds.), *The Cognitive Basis of Science*, pp.133-153, Cambridge University Press, 2002.
- 15) 拙稿、「中等理科教科書における教材としてのアナロジーの多面的な活用－水流モデルに基づいた電気回路の教授過程の日英比較を通じて－」、『教材学研究』、19、29-38頁、2008。
- 16) 堀 (1998) の調査では、80%の児童が図2のようなつなぎ方で豆電球に明かりがつくと考えていた。堀哲夫 (編著)、『問題解決能力を育てる理科授業のストラテジー－素朴概念をふまえて－』、69-71頁、1998。今回の授業でも、教師が授業中に挙手で回答を求めた場合も、同様の傾向にあった。
- 17) 図3のような児童の回答は、A小学校の別のクラスで予備的な調査を行ったときに、確認されたものである。
- 18) Clement, J., “Expert Novice Similarities and Instruction Using Analogies”, *International Journal of Science Education*, 20 (10), pp.1271-1286, 1998.
- 19) Duit, R., “On the Role of Analogies and Metaphors in Learning Science”, *Science Education*, 75 (6), pp.649-672, 1991.
- 20) マッハのいう「連続性の原理」での「最初の場合に得られた見解をできるだけ固持しようとする」という部分には、演繹的な推論プロセスがあることを示唆している。一方で、アナロジーの認知プロセスそれ自体が、各要素を個々に対応付ける、いわゆる、「写像 (mapping)」ではなく、一種の演繹的な推論と見なせるという指摘もある。鈴木宏昭、『類似と思考』、90頁、1996、共立出版。
- 21) 前田直子、『日本語の複文－条件文と原因・理由文の記述研究』、240頁、2009、くろしお出版。
- 22) 坂原茂、『日常言語の推論』(新装版)、100-101頁、2007、東京大学出版会。
- 23) Khan, S., “What If Scenarios for Testing Student Models”, in Clement and Rea-Ramires (eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science*, pp.139-150, 2008, Springer.

<資料1>

3年 組 なまえ

(1) 下のかん電池、豆電球、どう線のつなぎ方の文章について、あなたの考えに近いものなここ()のなかでえらんで、○をつけましょう。

① 豆電球のあたりが通っているとき、豆電球のガラスのところにも電気の通り道があると思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

② かん電池のあたりが通っているとき、豆電球のなかにも電気の通り道があると思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

③ かん電池、豆電球、どう線があっても、ソケットをつかわないと、豆電球にあたりが通らないと思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

④ かん電池、豆電球、どう線があっても、どう線が2本ないと、豆電球にあたりが通らないと思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

⑤ 豆電球のあたりをつけたいとき、かん電池のまわりのところは金属でできているから、どう線をかん電池のどこにつなげてもよいと思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

⑥ 下の図のアのつなぎ方で豆電球のあたりが通るかどうかわかっているか、どう線の数が違ってても、イのつなぎ方で通るかどうかわかっているか、考えられると思う。

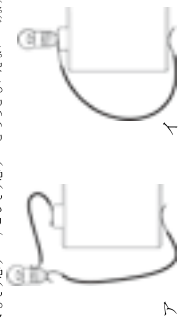
() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

⑦ 下の図のアのつなぎ方だと、豆電球にあたりが通らないと思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない

⑧ 下の図のイのつなぎ方だと、豆電球にあたりが通らないと思う。

() とても思う すこし思う どちらともいえない ほとんど思わない



(2) 下のかっこ()に文章を入れて、豆電球と電気の通り道についての説明をかきまかせさせてください。

① かん電池、豆電球、どう線が1つの輪のようにつなげられていたら、

--

② 豆電球がつかない場合は、

--

(3) かん電池、豆電球、どう線を下の図のようにつなぎました。①～⑤のうち、豆電球にあたりがつかないものをえらび、そのわけをできるだけ詳しくかきまかせください。



ばんごう	
わけ	

(4) 豆電球にあたりをつけるつなぎ方をべんきょうして、ぎもんに思ったことやもつど知りたいたいと思つたことをかきまかせよう。

