大学における技術科電気領域の学習指導法：予備的研究

福間 則夫 ・ 足立 明久

A Teaching Method of Electricity Learning in Industrial Arts Education at the University Level : A Preliminary Study

Norio FUKUMA and Akihisa ADACHI

Received October 1, 1990

抄録 ： 本研究は大学の技術科電気領域を対象にして，学習者に転移可能性の高い知識を形成させるための学習指導法を，実験的方法によって検討したものである。主たる結果は次のとおりであった。（1）学習者のレディネスを考慮しながら上位の原理や公式についてのヒントを与え，最終的には現象的な問題と根本的な原理との相互関係の考察を通して，全体的な図式を自分自身で再構成させることが有効である。（2）電気の体系的な知識を形成するためには，手続き的知識だけではなく，電気についての最も根本的な概念や原理の意味を理解する必要がある。以上の結果は次のことを示唆している。学習者に転移可能性の高い知識を形成させるためには，まず学習者自身に「体系的な図式を構成する」という目的意識を持たせることが必要であり，その上で表面的水準の公式（特に手続き的知識）と根本的な原理（意味的知識）との相互関係について考察するように指導することが重要である。

索引語 ： 学習指導法，電気の学習，転移可能性の高い知識形成

Abstract : The purpose of this study is to consider a method of teaching the fundamentals of electricity at the university level. This method imparts knowledge of wide application. Four problems based on the typology of the problem at the superficial level were given to five male students, and their thinking processes were recorded by self-reporting. When a student showed difficulty in solving these problems, he was tutored in basic principles relevant to the problem. Subjects' thinking processes were analysed from the viewpoint of the interrelations between the superficial and fundamental knowledge needed to solve the problems. The main results were as follows: (1) It might be effective to give a hint about principles or formulae a little higher than the level of the learners' readiness, and finally to make leaners reorganize the whole scheme by themselves through finding out interrelations between phenomenal problems and fundamental principles; (2) In order to form a systematic knowledge of electricity, knowledge of fundamental principles is indispensable. These results indicate that in order to get learners to form knowledge of wide application, guiding them to think about interrelations between superficial formulae (procedural knowledge) and fundamental principles (semantic knowledge) is very important for the purpose of organizing the whole scheme.

Key Words : teaching method, electricity learning, formig knowledge of wide application

目的と問題意識

本研究の目的は予備的研究として，認知心理学的観点から大学の技術科電気領域に関する学習指導法の探索を行うことである。

この背景となる問題意識は次のとおりである。大学の教員養成課程の技術科で学生が修得した知識体系や思考様式のあり方は，彼らが卒業後に教員となって生徒の学習指導を行う場合の重要な基盤となるであろう。では，創意工夫の能力等を重視する技術科教育の担い手を育成すべき大学教育においては，学生にどのような知識体系や思考様式を修得させればよいのか，またそのための学習指導法はいかにあるべきか。このような問題意識に基づいて，足立・手島（1990）は技術科機械領域で学生が修得するのが望ましいと思われる知識体系や思考様式のモデル，およびそれに関連する学習指導の内容面について試案を提出した。

ところで，学習指導法の考察には少なくとも内容的次元と過程的次元の二つの観点が必要であろう(足立，1989)。前者は学習の内容的側面（何を学習させるのか）に焦点を当て，学習者が修得すべきであると考えられる知識体系を明かにしようとする。後者は学習内容をどのような過程を経て有効に修得させるのかという方略的側面（いかに学習させるのか）を明かにしようとする。

足立・手島（1990）では主として前者の内容的側面を提示したが，後者の過程的側面は今後の課題として残された。そこで本研究では，足立・手島（1990）と同様の問題意識のもとに技術科電気領域を対象に，主として学習指導法のダイナミックなプロセスに焦点を当てて，方略的側面に関する探索的研究を行うことにした。

方　　法

1　問題の設定

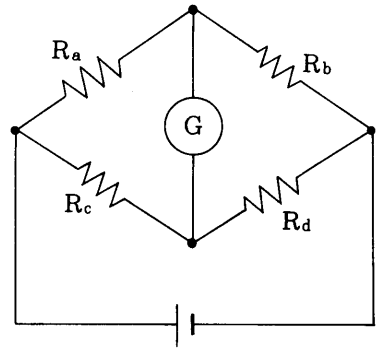
足立・手島（1990）で指摘したように，問題の表面的な特徴によって問題を分類したいわゆる「問題のタイプに基づいた知識構造」は，特定の現象へのいわば対症療法的な対応の仕方としては有効であるが，未知のタイプの問題や複雑な問題に出会った場合には，まったく対応できなくなる(大沢，1982参照)。学生が修得すべきであると思われる知識体系や思考様式は，もっと転移や創造的思考の可能性が高くなるようなものが望ましい。転移可能性や創造的思考の可能性を高めていくためには，「問題タイプ中心型」の知識構造から，より根本的な「原理，法則，概念等を節点とする意味的ネットワーク構造」による問題の理解が可能な知識構造へと変化させていくような指導が必要となる。しかし，はじめに原理や法則を抽象的な次元で学習しただけでは，それをいきなり現象の理解や解決へ適用することは困難であるから，現象的問題に即応した問題タイプ中心型の問題解決の練習を行うとともに，その現象的な問題の背後にある原理や法則等との「相互関連性」に注目させていくような学習指導法が有効であると考えられる(足立・手島，1990)。

そこで本研究では，上記の学習指導法の有効性を検証する意味も含めて，「問題タイプ中心型」の知識とより根本的な「原理，法則，概念等を節点とする意味的ネットワーク構造」に関係した知識との「相互の関係づけ」に注目し，その関係づけについてどのように指導すればよいのかを実験的方法で検討することにした。

そのために，まず現象的，表面的な「問題タイプ中心型」の回路網理論に関する例題を次のように４つ作成した(**問題１，２，３，４**参照)。

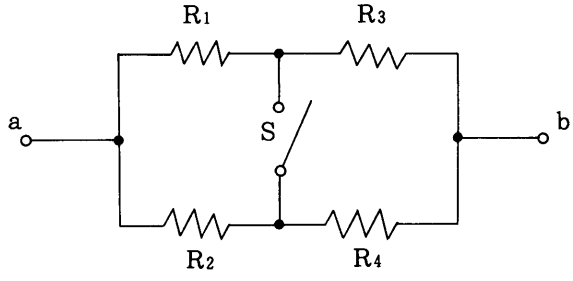
問題１

次のような回路がある。検流計Ｇに電流が流れないとき，R_bの抵抗はいくらか。ただし，R_a，R_c，R_dはそれぞれ４Ω，６Ω，９Ωとする。



問題２

図のように抵抗R_1，R_2，R_3，R_4を接続し，端子ａｂ間に40Ｖの電圧を加える。スイッチＳを開閉しても全電流が変化しない場合，R_2，R_4はそれぞれ何Ωか。ただし，全電流は５Ａとし，R_1，R_3はそれぞれ16Ω，８Ωとする。

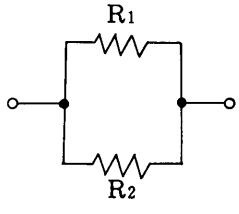


問題３

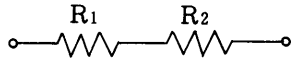
R_1およびR_2の２個の抵抗がある。

これらをそれぞれ図のように接続したとき，端子からみた全体の抵抗はいくらか。

(a)

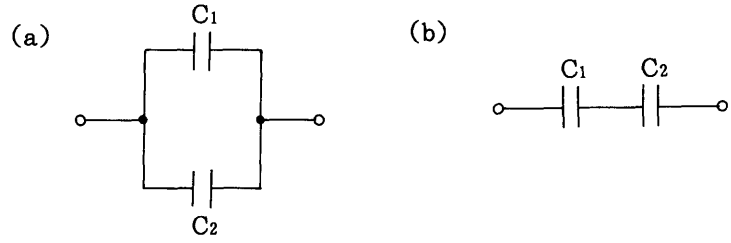


(b)



問題 4

静電容量が C_1 と C_2 の 2 個のコンデンサがある。
これらを図のように接続したとき，端子からみた全体の容量はそれぞれいくらか。



それらの各例題を解決するために必要不可決な知識構造を示すと，それぞれ**表 1**，**2**，**3**，**4** のようになる。

表 1

①問題タイプの特徴
　ホィートストンブリッジ
②宣言的知識
　ブリッジの平衡条件
　　ホィートストンブリッジが平衡するためには対辺の抵抗の積が等しくなければならない。
③手続き的知識
　$R_b = R_a R_d / R_c$

表 2

①問題タイプの特徴
　抵抗の直並列接続あるいはブリッジ
②宣言的知識
　オームの法則
　　抵抗に加えられた電圧とそこを流れる電流は比例する。
　キルヒホッフの電流則
　　節点に流入する電流の和は零に等しい。
　直列接続された抵抗の合成抵抗は抵抗の和である。
　並列接続された抵抗の合成抵抗の逆数は抵抗の逆数の和である。
　ブリッジの平衡条件
③手続き的知識

$E = RI$	$1/R_{12} = 1/R_1 + 1/R_2$
$I = I_1 + I_2$	$R_1 R_4 = R_2 R_3$
$R_{13} = R_1 + R_3$	

表 3

①問題タイプの特徴
　抵抗の並列接続と直列接続
②宣言的知識
　オームの法則
　キルヒホッフの電流則
　キルヒホッフの電圧則
　　閉路を一巡するとき電圧の和は零である。
③手続き的知識
　$V_1 = R_1 I_1$
　$V_2 = R_2 I_2$
　並列接続
　　$V_1 = V_2$
　　$I = I_1 + I_2$
　直列接続
　　$I_1 = I_2$
　　$V = V_1 + V_2$

表 4

①問題タイプの特徴
　コンデンサの並列接続と直列接続
②宣言的知識
　静電容量の定義
　　コンデンサに蓄えられる電気量は印加電圧に比例し，比例定数がそのコンデンサの静電容量である。
　キルヒホッフの電圧則
　電気量の保存
　　コンデンサに蓄えられる電気量は保存される。
③手続き的知識
　$Q_1 = C_1 V_1$
　$Q_2 = C_2 V_2$
　並列接続
　　$V_1 = V_2$
　　$Q = Q_1 + Q_2$
　直列接続
　　$V = V_1 + V_2$
　　$Q_1 = Q_2$

次に，例題ごとに異なった表面的な特徴を共通に説明しうる，より根本的な「原理，法則，概念等を節点とする意味的ネットワーク構造」を示すと**図1**のようになろう。

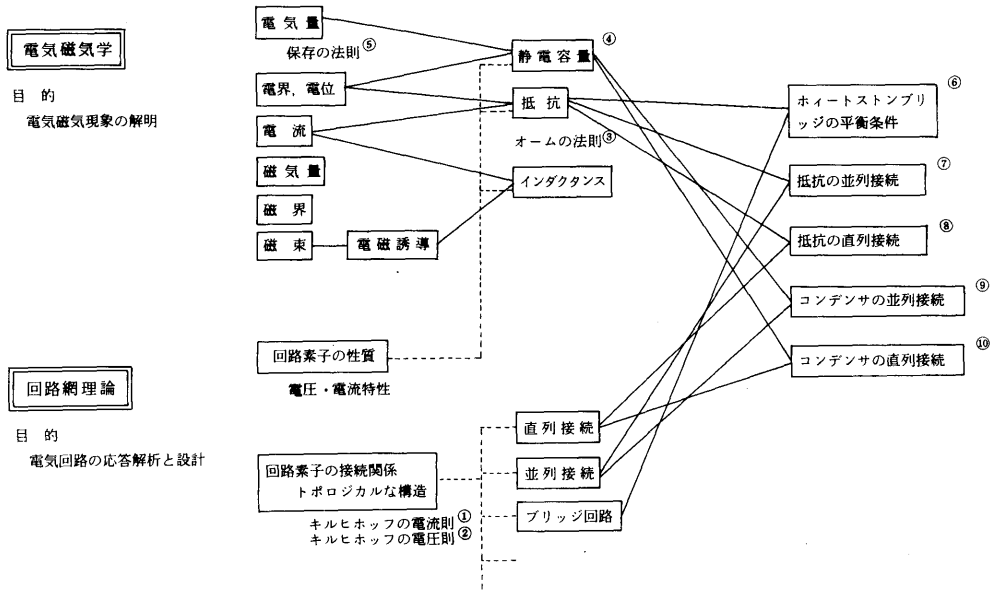


図1　原理，法則，概念等を節点とする意味的ネットワーク構造

この図は**問題1～4**に直接関係する回路網理論の一部の構造を示したものである。『電気磁気学』は電気・磁気に関する物理現象の解明を目的としており，具体的には電気量，電界，電流，磁気量，磁界やその間の関係等について研究する。一方，『回路網理論』は電気回路の応答解析と設計を目的としており，電気磁気現象を応用する一つの分野である。そこでは，電気磁気学から導かれる，抵抗・コイル・コンデンサ等の回路素子の性質（電圧・電流特性）とその回路素子の接続関係（トポロジカルな構造）から回路各部の諸量や周波数に対する応答等を求める。「回路素子の性質」，「回路素子の接続関係」と点線で結ばれているものはそれぞれの具体的な内容を表わしている。また，実線で結ばれている二者のうち左側にあるものは右側のものに比しより上位の概念であることを表わしている。

2　実験の手続き

被験者に実験の背景，目的を簡単に説明し，1問ずつ1枚の用紙に記載した問題に解答してもらう。1問の解答が終わった（被験者がそれ以上は解けないとした時点）ところで，各自から解答するとき考えたことを聞き取り，それを録音した。正しい答えが得られていないときには，問題を考えるうえで必要な原理，法則等について説明し，もう一度解答してもらう。原則として，このような手順を4問について繰り返し，総所要時間は1時間半程度であった。実験は1990年9月に実施した。

3 対　象

被験者はK大学技術科の4回生男5人で，実験で課せられた問題を解くのに最小限必要なことは学習ずみである。

結　果

図1を参照しながら被験者ごとに実験結果を述べる。なお，文中の①～⑩は図1の当該箇所を指す。

A君

問題1

ホィートストンブリッジの平衡条件⑥を記憶しており，これを未知抵抗を直接求める式に変形して利用する。ただし，名称と内容を取り違え，それをキルヒホッフの法則①②と勘違いしている。平衡条件を忘れたらどうするかとの問いに対しては全く分からないと答える。

問題2

全電流と印加電圧からオームの法則③を用いて，全抵抗を計算する。スイッチが開いている状態では，直列接続⑧された2組の抵抗が並列接続⑦された回路となっていることから，計算した全抵抗を用いて未知抵抗の和についての式を求める。ブリッジ回路であることに気づき，その平衡条件⑥から未知抵抗に関するもう一つの式を導き，先に得た式と連立させて解く。

問題3

公式⑦⑧を記憶しているが，キルヒホッフの法則①②，オームの法則③からは公式を導けない。オームの法則③はよく理解しているので，キルヒホッフの法則①②だけを詳細に説明する。この説明を聞いて公式⑦⑧を導くことができた。

問題4

並列接続は公式⑨を記憶しているが，直列接続の公式⑩は思い出せない。公式自体を導くよう指示したところ並列接続も直列接続も導けない。前問のキルヒホッフの法則②は知っているが，これは電圧だけに関する法則で，その他に静電容量を含む何らかの式がないと解決できないことは明かである。静電容量の定義④，電気量保存の法則⑤をヒントとして与えることにより並列接続の公式⑨は導けるが，直列接続の公式⑩は導けない。電気量保存の法則⑤についてもっと詳しく説明するがそれでも導けなかった。こちらの呈示した解答は理解できた。

B君

問題1

ホィートストンブリッジの平衡条件⑥を適用し正しく解答する。平衡条件の導出の過程は全く説明できない。

問題2

ブリッジ回路であることに気づき，その平衡条件⑥を適用する。問題に記載された，解答に必要な印加電圧，全電流を用いず答えを得ているが，その根拠は不明である。

問題3

直列接続の公式⑧は記憶しているが，並列接続の公式⑦は覚えておらず，どちらも根本原理か

ら導くこともできない。根本原理であるオームの法則③は理解しているので，キルヒホッフの法則①②のみを説明し，その結果公式を導くことができた。

問題 4

公式を習った覚えはあるが思い出せない。静電容量の定義④と電気量保存の法則⑤の説明を受けて並列接続⑨と直列接続の公式⑩が導ける。とくに，他の人がつまずいた直列接続についてはもっとも早く公式を導くことができた。

C君

問題 1

ホィートストンブリッジの平衡条件⑥を記憶している。数値を代入してから変形し未知抵抗を求めた。平衡条件自体は，オームの法則③とキルヒホッフの法則①②から求められると考えている。ただし，キルヒホッフの法則を手続き的知識のレベルまで正確には思い出せない。

問題 2

ブリッジ回路とは見なさない。スイッチが開いているときは直列接続された 2 組の抵抗⑧が並列接続⑦されている，またスイッチが閉じているときは並列接続された 2 組の抵抗⑦が直列接続⑧されていると回路の接続関係をみて，解答する。全抵抗はオームの法則③により正しく求める。上記の 2 つの回路の状態にそれぞれ対応する，未知抵抗についての式を得るが，スイッチが開いている場合の直列接続⑧の抵抗計算の式に誤りがあり（問題 3 では正しい公式を解答している。），解答を途中で断念した。次問のことがあるので，ヒントを与えることができなかった。

問題 3

正しい公式⑦⑧を記憶しているが，より上位の概念からこれを導くことはできない。オームの法則③はよく理解しているので，キルヒホッフの法則①②のみをヒントとして与え，両公式が導けた。

問題 4

正しい公式⑨⑩を記憶しているが，これを導くことはできない。静電容量の定義④，電気量保存の法則⑤を説明した後，きわめて正解に近い解答を出すが，最後の詰めで数式を扱う上での軽い混乱を起こした。

D君

問題 1

ホィートストンブリッジの平衡条件⑥に数値を代入した後，未知抵抗について解く。平衡条件そのものは導くことができず，方針も分からない。

問題 2

ブリッジ回路と気づく。スイッチが開いている場合の全抵抗を直列接続された 2 組の抵抗⑧の並列接続⑦として求め，これをオームの法則③により印加電圧，全電流と結びつけて第 1 式を得る。第 2 式はブリッジの平衡条件⑥より求める。計算間違いで得られた抵抗値そのものは正しくないが，解答方針は正しい。

問題 3

正しい公式⑦⑧を記憶しているが，これを導くことはできない。オームの法則③はよく理解し

ているので，もう一つの根本的レベルの原理であるキルヒホッフの法則①②のみをヒントとして与え，その結果両公式が導けた。

問題 4

正しい公式⑨⑩を記憶しているが，より上位の共通原理からは導けない。静電容量の定義④，電気量保存の法則⑤の説明を受けた後，正しく公式が導ける。

E君

問題 1

ホィートストンブリッジの平衡条件⑥に数値を代入した後，未知抵抗について解く。平衡条件そのものは導くことができず，方針も立たない。

問題 2

ブリッジ回路と気づき，平衡条件⑥を適用して第1式を得る。次に，スイッチが開いている場合を考えて，直列接続された未知抵抗を流れる電流を，直列接続された抵抗の公式⑧，オームの法則③，電流連続の法則①を用いて求め，第1式とオームの法則③から未知抵抗を得る。

問題 3

正しい公式⑦⑧を記憶しているが，より上位の法則からは導くことができない。オームの法則③は充分に理解しているので，キルヒホッフの法則①②のみを説明し，これにより公式が導けた。

問題 4

並列接続については公式⑨を記憶しているが，直列接続⑩は思い出せず，導出する方法についてはどちらの場合も分からない。静電容量の定義④，電気量保存の法則⑤について説明を受け，その結果両公式が導けた。

考　　察

表1～4の各問題に関する「宣言的知識，手続き的知識」および図1の「原理，法則，概念等を節点とする意味的ネットワーク構造」を参照しながら，問題ごとに各被験者の反応の意味を分析する。

問題 1

どの被験者もホィートストンブリッジの平衡条件を正確に記憶しており，それを用いて未知抵抗の値を得ることができた。しかし，この平衡条件自体の導出については，一人を除いて，方針すら分からず，平衡条件の理解がきわめて表面的で，いわゆる丸暗記に近い状態であることが窺われる。これに対して，方針の分かったC君は図1のブリッジ回路に関する知識構造の部分，すなわち，平衡条件は，より根本的なレベルにある「オームの法則」と「キルヒホッフの法則」から導かれることについては理解していると思われる。「オームの法則」は内容を正しく記憶していたので，「キルヒホッフの法則」についてのみ説明すれば平衡条件は導くことができたと考えられる。なぜならば，ブリッジ回路に関連する範囲については，現象的なレベルにある平衡条件と根本的なレベルにある2つの法則およびそれらの相互関係を含めた全体的な図式を構成できると思われるからである。この場合，さらに体系的な知識を獲得することも可能であろう。

問題 2

これは，平衡のとれたブリッジ回路とみるか否かによって，大きく分けて２つの解法があり，前者の方が簡単に解ける問題である。問題１の直後であるので，いっそう類似性に気づき易かったと思われ，実際一人を除いて，ホィートストンブリッジの平衡条件を用いている。このことは，出題の順序により暗黙のうちに接続関係の類似性を指摘することで，前問の知識の転移が促進されたことを示すといえよう。「回路素子の接続関係」は，素子の実際の配置状態とは関わりなく，素子の持つ２つの端子がどの素子と接続されているかというトポロジカルな構造のみによって定まる。このような「接続関係」（どのように変形しても切り放さない限り保存される。）は電気固有の概念ではなく，数学的な広がりのある概念である。本問の回路が前問のそれとトポロジカルに同じ構造を持っていることに気づいた人がホィートストンブリッジの平衡条件を用いたのである。ただ一人Ｃ君が平衡条件を使わなかった理由を推測してみると，ブリッジ（橋）の部分に前問では抵抗を持った検流計があるのに対し，この問題ではスイッチに代わっているので，これらの問題の間には回路素子の有無の違いがあり，異なった構造であるとみたのかも知れず，その点では，他の人よりも素子の接続関係についてより深い理解があるともいえる。ブリッジ回路が平衡していなくて検流計に電流が流れている場合には確かに異なった構造となり，電流が流れない場合にはじめて両者は同じ構造であるといえるのである。あるいは，解答方法が複数個ある場合のもっと一般的な理由，すなわち，初めに考えついた方針で解答を進めていって特に致命的な不都合に陥らなかったため，改めて別の考え方を強いられることはなかったのかも知れない。どのような理由によるのかは不明であるが，前の理由であれば次のようなことが考えられる。基本的な「オームの法則」や「キルヒホッフの法則」を充分に理解しておれば，例えば，ホィートストンブリッジの感度のような，平衡がとれるまでの過程を問題とするときにも対応できよう。それに対し，現象的な平衡条件はこの問題の解決には役立たず，このような表面的な知識は転移できないことは明かである。

問題３

一人を除いて並列接続，直列接続の両方の公式を記憶している。この接続方法は極めて基本的な抵抗の接続関係であり，公式を利用する機会も多いため，よく定着しているものと思われる。電流を水の流れに，電気抵抗をその中を水が流れるパイプに例えて定性的に理解している人が大部分で，**図１**に示す公式導出の筋道に沿って，より根本的な共通原理である「オームの法則」と「キルヒホッフの法則」から導ける人はいない。「オームの法則」は宣言的知識のレベルにおいてもまた手続き的知識のレベルにおいても充分に理解されているが，「キルヒホッフの電流則・電圧則」はどちらのレベルでも曖昧であったので詳しく説明したところ，全員公式を導くことができた。このことは，根本的な共通原理に関するヒントを与え，これと現象的な問題との相互関係を考えさせることが転移可能性の高い知識構造の構成に有効であったことを示している。

問題４

問題３とよく似ているが，被験者に抵抗の場合ほどの馴染みはない。並列接続の公式が比較的よく記憶されているのは，コンデンサが貯水池のイメージで理解されているからである。しかし，このイメージはコンデンサの本質を捉えていないので，直列接続を考える際にはかえって邪魔となる。実際直列接続の公式は並列接続の公式に比べてあまり記憶されておらず，貯水池のイメージも公式を思い出す手がかりになっていない。アナロジーは時と場合によっては威力を発揮するが，その対象と適用範囲の限界をよく見極めなければならない。導体中の電子の振舞いのような極めて根源的な性質（最も根本的な概念や原理の意味）を理解せずに，アナロジーや表面的な類

似性に頼っても決して解決できないことが分かる。接続関係は問題3と全く同じであるから前問と同様に「キルヒホッフの電圧則」は使えるが，その他に「静電容量の定義」と「電気量の保存」という新しい知識が必要であり，現象的なレベルの類似性があることから，それに関連する共通原理を応用するだけではこの問題は解けない。より根本的な原理と表面的現象との相互関係からなる体系的な図式が重要で，これが理解されているもとで，はじめて類似性を指摘する等の意味があり，図式の理解なしにはかえって誤解を生むもととなろう。実際，どちらの公式も記憶していなかったB君が，根本的なレベルの原理の説明を聞いていち早く解答できたのは，誤った先入観がなく白紙の状態であったためと思われる。

今後の課題

被験者へのインタビューで，場合に応じたきめ細かい適切な質問ができず，彼らの思考過程を充分に聞き出すことができていない。どんな場面が有り得るかを前もって予備実験で把握し，それへの対応を考慮しておく必要がある。また，実験時間が充分にとれず慌ただしく実施したので，短い時間で解答可能な，基本的ではあるが簡単な問題ばかりを課することになった。そのため，できるかできないかの何れかとなり，様々なレベルの解答がなく手がかりが少なくなったように思われる。

前項の反省を踏まえた上で，知識の転移可能性を高めるためには，学習者が現象的な問題と根本的な原理との相互関係を考え，体系的図式を再構成できるよう指導することが有効であるということをより明確に実証し得るデータが収集できるように，さらに綿密な実験計画を立てる必要がある。

文　献

足立明久 (1989) 技術科教育における学習意欲の構造とメカニズム（2）：学習指導法の仮説的モデル．京都教育大学紀要 Ser. A, No.74, 97-114.

足立明久・手島光司 (1990) 大学における技術科機械領域の学習指導法に関する認知心理学的考察．京都教育大学紀要 Ser. A, No.77, 61-72.

大沢啓子 (1982) 熟達者－初心者の差異．波多野誼余夫（編）「学習と発達」（認知心理学講座4），東京大学出版会.