

# 認知心理学における学習の問題

無 藤 隆

## **Problems of Learning in Cognitive Psychology**

---

This article presents a survey of works of research related to ways in which problems of learning are dealt with in Cognitive Psychology. I have, in the past, presented a similar study in the sixth chapter of Anzai *et al.*: *Introduction to Cognitive Psychology through LISP* (1981) entitled "Development and Prospects of Learning Models". In this paper, however, I have completely revised and added to this previous article, centering on more recent orientations.

## 1. 知識の組織

1960年代において学習は2つの種類の知識に分けられてとらえられてきた。事実・概念についての知識と物事を実行するときの知識とである。ここでは、事実や概念の知識は考えの間の連合のネットワークであり、物事を実行するときの知識は刺激と反応の間の結合の集合であると考えられていたが、1970年代に入り、これらの知識の組織化についての考えが大きく変わることになる(Greeno, 1980)。

概念的、事実的な知識についてまず見てみよう。ここでは、スキーマ(schema)という概念が根本的な変革の役割を担うことになる。スキーマとは、データを受け入れる構造ないし処理する手続きの一般的・抽象的な形式であり、個々の経験の要素を組織したり、経験自体には特に含まれていないが、表現を一貫させ、完全なものにするのに必要な要素を含みこんだりするのに使われるものである。たとえば、図1の“*Ida borrowed the tablecloth.*”という文での borrow (借りる)という所有動詞のスキーマによる分析を見てみよう。図の上の部分では、動詞の格(case)による分析がなされている。借りるという行為の行為者(agent)が *Ida* であり、目的格には *tablecloth* がくる。図の下の部分ではスキーマを拡張した結果が示されている。行為を行なったのは *Ida* である。その行為は、*tablecloth* の所有に変化を引き起こした。誰かの所有から *Ida* の所有へと所有が変わっている。さらに、*Ida* はその誰かに *tablecloth* を返す義務を負っている。これらのことが、スキーマ表現で示されている。borrow という動詞が正しく理解されているならば、このような構造を頭の中にもっており、“*Ida borrowed the tablecloth.*”というような文に出会うと、具体化されて、その文の表現(表示)を長期記憶内に作り出すのである。そして、たとえば、義務というような、文の表面には全く出ていないことの理

図 1 借りる (borrow) の意味と “Ida borrowed the tablecloth.” から理解される意味的情報のスキーマ的表現 [Gentner, 1975]

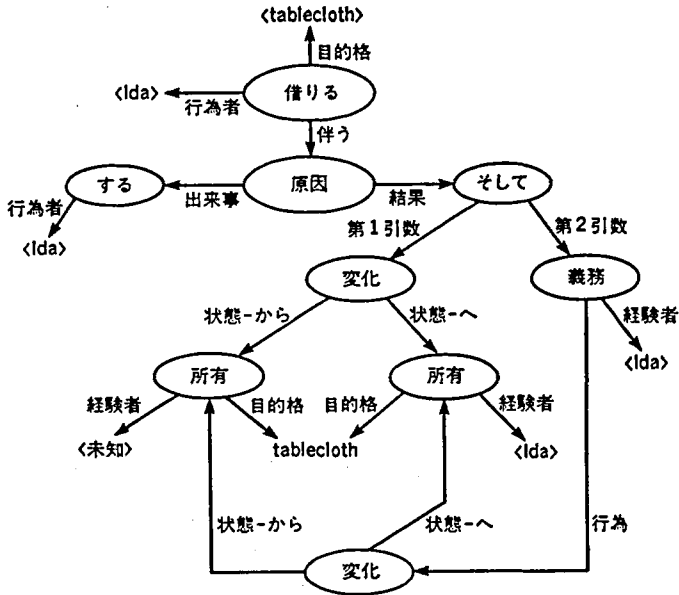


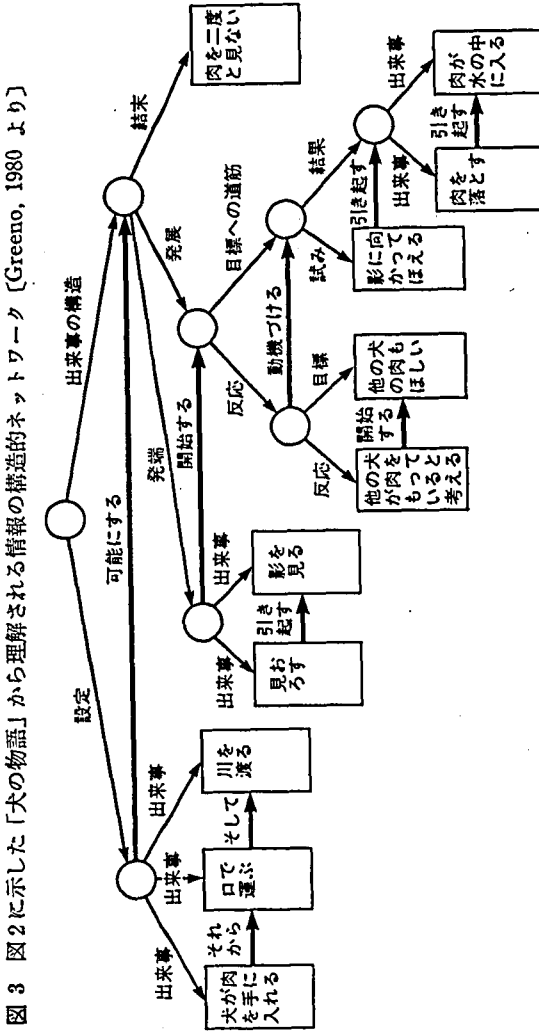
図 2 犬の物語 [Mandler & Johnson, 1977]

1. あるとき、犬が肉を一切れ手に入れて、
2. 口にくわえて、家までもって帰ろうとした。
3. 帰る途中、小川にかかった橋を渡らなければならなかった。
4. 渡りながら、犬が下を見おろすと、
5. 自分の影が水に映っているのが見えた。
6. 別の犬が肉をくわえているなど考えて、
7. 犬はその肉もとろうと決めた。
8. そこで、犬は影に向かってほえた。
9. しかし、犬が口を開けると、肉は落ちて、
10. 水の中に入ってしまい、
11. 二度と見えなくなった。

解までもが容易になされるのである。

また、スキーマに基づいた別の理論としては、簡単な物語の理解の分析がある。図2にイソップのごく簡単な物語が書いてある。この簡単な物語

の過程は意外に簡単ではない。物語の一般的な構造についての理解が必要だからである。図3に物語の理解の過程で達成される統合的な構造が示してある。まず始めに、設定 (setting) がなされ、次に出来事 (event) の



記述が来る。おのおのの下部の構造がある。出来事の記述の下では、エピソードの様々の部分の区別——発端、発展、結末——がなされる。さらに、世界についてのいろいろな知識に基づいて、いろいろな関係が理解されている。たとえば、水に映った肉をほしいという状態とほえるという行為の間の関係は「動機づけ」であるし、ほえることと肉が水に落ちることの間の関係は、「因果的」である。

こうして、図2の簡単な物語は次のように解説される。ある設定がある。そこでは、犬が肉を得て、それから、肉を口にくわえ、川を渡る。その設定のおかげで、次の出来事が可能になる。まず発端の出来事が生ずる。犬が下を見て、そのことが、水に映った自分の影を見るということを引き起こす。この発端が次の出来事を開始し、発展が生ずる。まず、発端への反応が起きる。もっと詳しく見ると、別の犬が肉をくわえていると思うという反応が生じ、そのことにより、他の犬の肉が欲しいという目標設定が開始される。それが、目標を実現するための道筋をとることを動機づける。そこで、影にはえるという試みを行なう。それが、次の結果を引き起こす。つまり、犬が肉を落とすことであり、それがさらに、肉が川に落ちるということを引き起こす。こうして最後に、結末をむかえ、肉を再び見ることがないということになる。

設定、出来事、目標などの組み合わせとその間の関係を物語の一般的なスキーマと考えることができる。読者は物語を読んで、理解していくときに、そのスキーマを具体化し、他の様々な事実に知識を利用しながら、図3にあるような知識構造を形成していくのである。そのような知識構造を形成することが、すなわち、理解ということなのである。

物語スキーマが単に物語を分析する枠組として有効だというだけでなく、読み手が物語を読んで理解する際に実際に用いているといえるためには、心理学的な実験によって確かめる必要がある。それらの実験の示すところによると、物語スキーマによって想定される構成素の一部が欠けていたり、順序が乱れた物語が提示されると、読み手は想起の際、欠けている

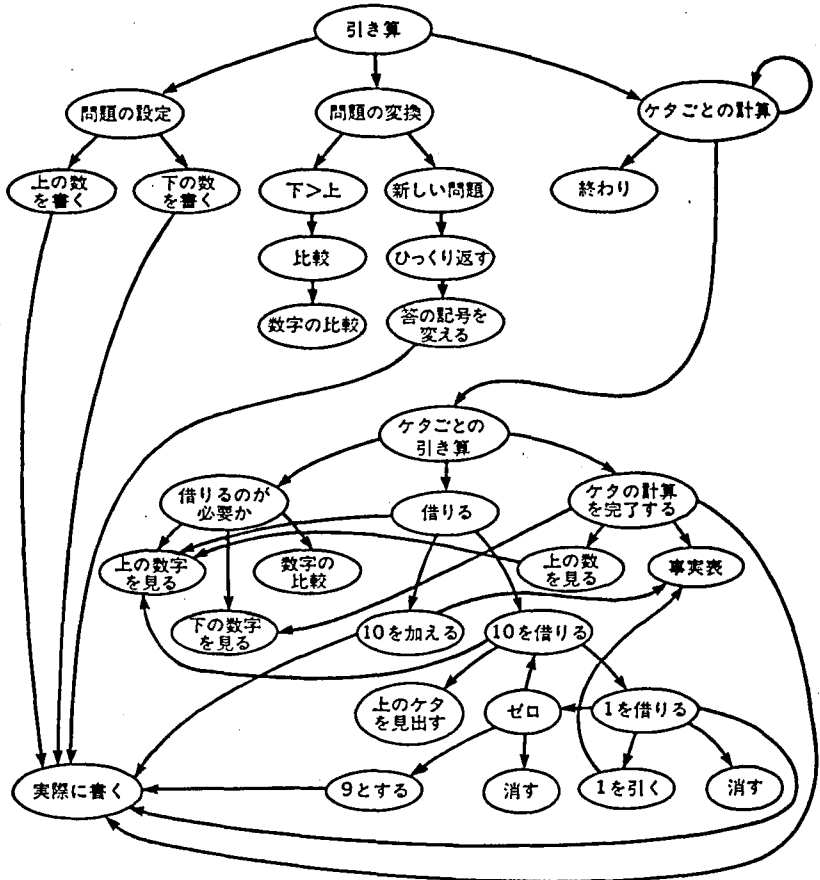
物を補い、順序を正しくする。あるいはまた、Mandler & Goodman [1982] は、物語内のエピソードを構成する構成素——発端、複合反応、試み、結果、結末——が確かに情報処理における単位をなすことを示すために実験を行なっている。読むのに要する時間は、構成素の初めて遅く、中途では速くなる。また、手がかりを与えての想起で、手がかりと思い出すべき文と同じ構成素内にある方が、隣り合わせの異なった構成素から各々来るより、反応時間が速くなる。これらのことから、想定される構成素が処理における単位となることが示される。

次に、問題を解決するときの手続き的な知識の組織の問題に移ろう。ここでも、また、複雑な知識構造を私たちは用いていることがわかる。

そのことをよく示すのが、J. S. Brown & R. R. Burton [1978] による、算数での引き算を行なうときの手続きについての手続きネットワーク表現である(図4)。より上位の全体的(global)な行為がその一部の下位の行為と結びつけられている。つまり、上に書いてあることをするためには、そこから線で結んである下の行為を順にしていけばよい。この図では、実際には必要なテストの部分が入っておらず、簡略化されているが、大体のところはわかる。

一番上から見っていくと、まず、引き算をする。そのために、左へ行って、問題を設定し、上の数、下の数をそれぞれ書く。そこで、引き算に戻って、変換する必要があるかどうかを考える。下の数が上の数より大きいかを見るには、数を比較する。そのために、各数字を比較する。変換の必要があったら、新しい問題にする。つまり、上の数と下の数をひっくりかえし、答えの記号を変える(マイナスにする)。引き算に戻り、各ケタごとに計算をしていく(ここで、再帰的になっていることに注意してほしい)。1つのケタで引き算をする。上のケタから借りてくる必要があるかを見るため、上の数字と下の数字をもって来て、比べる。ケタの引き算に戻って、借りる必要があれば、上の数字に10を加え、その10を書く。10を借りるために、上のケタに行き、上の数字を見、0であれば、それを消して、

図 4 引き算の手続き的ネットワーク [Brown & Burton, 1978 より]



9とし、さらに上のケタへ行く。0でないところで、1を借り、そのケタの上の数字から1を引いておく。そのためには、事実表を参照し、結果を書いておく。そこで、引き算ができるようになったので、ケタの引き算から、ケタの引き算を完了するところへ行き、上の数と、下の数字を比べて、事実表を参照して、引き算の答えを出す。ケタごとの計算に戻り、結果を書き、上のケタへと進み、同じことをくりかえす。ケタがなくなれば、終わりである。

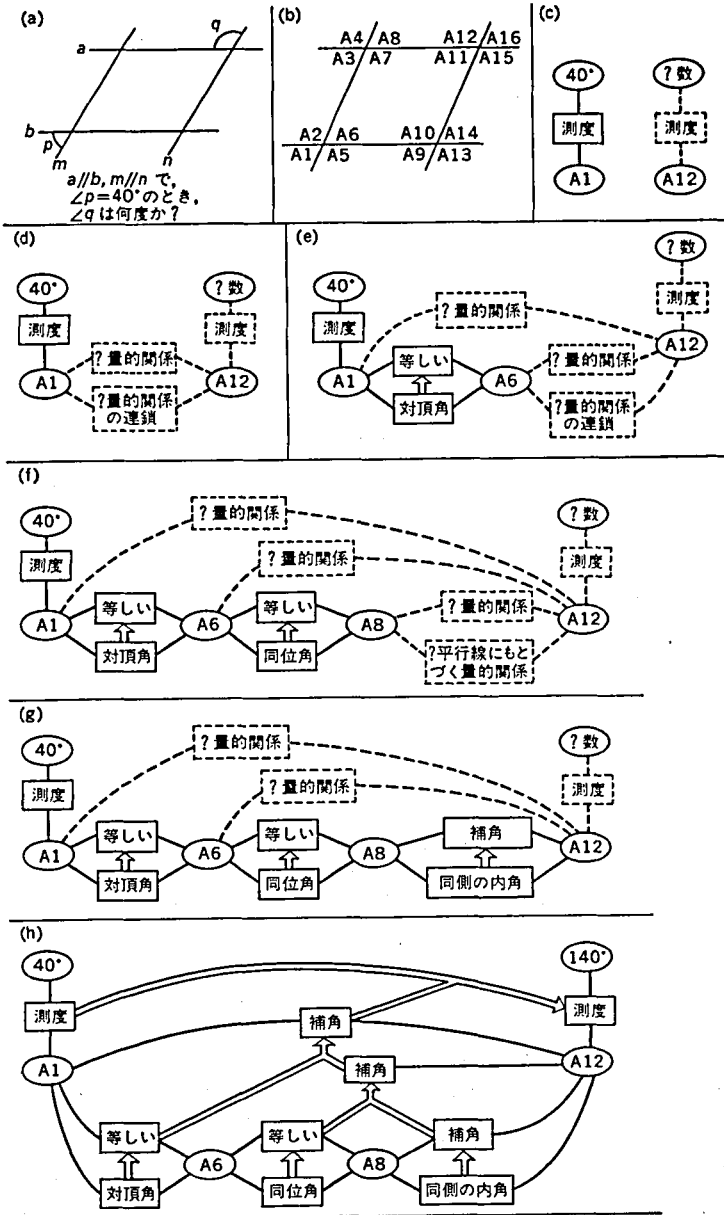


Brown & Burton は、このネットワーク表現をシミュレートして、子どもが引き算の計算において、どこを間違えたのかを見出す診断システムを作っている。引き算のような簡単と思われる行為が、詳細に分析してみると、実に複雑なものであることがわかる。そして、それが、手続きネットワークの考え方で表現可能なのである。Brown & Burton のこの仕事は、一見単純な行為の裏にある複雑な手続きを明確に表現したという点で優れているだけでなく、「エキスパート」である大人には想像もできないようなところで、学習途上の子どもはつまずきうるのだし、現につまずいていることを示しており、さらに、その具体的な診断の手続きを提供してくれているのである。これは現代の認知心理学の成果が、学校での教育に対しても有用な働きを示し始めている良い例でもある。

これまで、概念的知識と手続き的知識とを分けて論じてきた。しかし、最近の動向として、両者を総合するための努力がある。その代表例として、Greeno [1978] の幾何の問題解決の分析がある。このモデルでは、問題状況を意味的ネットワークの形で表現している。問題を解くための手続きは、「プロダクション・システム (production system)」の形である(問題での情報パタンのテスト条件があり、それに合うと、新しい情報と関係が作り出される。このようなプロダクションが多く集まってシステムを成す)。問題を解く過程は、意味的推論をなす過程としてとらえられている。しかし、それはどのような意味的推論でもよいというのではなく、問題を解くための目標との関連での推論でなければならない。ここで、このモデルは、理解に含まれる推論過程と問題解決の過程とを結びつけているのである。

図5を見てみよう。問題は(a)にある。線分  $a$  と  $b$  が平行、 $m$  と  $n$  が平行のとき、角  $p$  が  $40^\circ$  であると、角  $q$  は何度であるか。いま、角に(b)のように名前を付けておく。ここで、問題解決者は、その知識として、3種類もっているとしよう。1つは視覚的パタンの再認である。たとえば、A1 と A6 が対頂角であることがわかる。第2に、推論のための命題をも

図5 幾何の問題とその解決のおおのこの段階における認知的表現  
 [Greeno, 1978 より]



っている。たとえば、対頂角は互いに相等しい。第3に、方略的知識をもつ。目標、下位目標を設定し、計画を立てるための知識である(図6)。さて、そこで、問題が何かをまず明らかにする。(c)にあるように、A1の測度は $40^\circ$ であることが知られており、A12の測度が未知である。(d)へ行く。まず、方略ルール1により、A12とA1の間の量的関係を見出すことを下位目標とする。そこで、方略ルール2に進むが、幾何的關係は知られておらず、第3の角との間に量的関係もない。ルール3へ進み、パタン認識(=視覚的パタンの再認)を試みるが、うまくいかない。ルール4へ進み、量的関係の連鎖を求めることにする。角の間をスキャン(走査)すると、A6、A11が見つかる。A6はA1と対頂角で等しいことがわかる。そこで、A6とA12の間の量的関係を見出す目標を立てる(e)。A6とA12は幾何的關係がない。その間の連鎖をとろうとする。A11はA6と関連しない。A7、A10はA6と等しくない。A3、A8、A9、A14はA6と等し

図6 図5に示した目標設定のための方略的知識 [Greeno, 1978 より]

1. もし現在の目標が角の測度を見出すことであるならば、その未知の角に何らかの量的関係に関連する別の角の測度を知っていれば、達成できる。もしそうでないならば、未知の角と測度を知っている角の間に量的関係を推論するという目標を設定せよ。
2. もし現在の目標が2つの角の間の量的関係を推論することであるならば、これは、2つの角の間に幾何的關係が知られているか、あるいは、その2つの角が共に第3の角と量的関係で関連しているならば、可能である。もしそうでないならば、その角の間の幾何的關係を推論するという目標を設定せよ。
3. もし現在の目標が2つの角の間の幾何的關係を推論することであるならば、パタン認識の手続きを用いて、その角の特徴を分析するという目標を設定せよ。
4. もし現在の目標が2つの角の間の量的関係を推論することであり、しかも、未知の角と測度の知られているどの角の間にも幾何的關係がないことがわかっているならば、空間的に2つの角の間にあり、2つの角の1つと等しい角を見出すという目標を設定せよ。これが達成されたら、その角を本来の目標におけるもう1つの角と、量的関係の連鎖を形成することにより関連づけるよう試みよ。

い。そのどれをとっても良いのだが、A8 をたまたま選んだとする。これは A6 と同位角で等しい (f)。次に、A8 と A12 を関連づける。これは、一方の辺が同直線で、他方の辺が互いに平行という関係になっている。そこで、平行線にもとづく量的関係を見出すという目標を達成するための計画を選択する。A8 と A12 は同側の内角であるので、補角となる (g)。関係の連鎖が完成し、量的関係を下から推論していくと、A1 と A12 の関係が補角であることがわかる。A1 は  $40^\circ$  であるから、A12 の測度が計算でき ( $=140^\circ$ )、問題が解決される。最終的な構造は (h) に示されている。

この最終的な構造は、問題を解いていく過程で形成されたものであり、学習されたのだということに注意してほしい。最終的構造の中では、初めの目標が達成されているばかりでなく、他のいろいろな性質や関係も、問題を解く過程で生み出されていることがわかる。たとえば、A1 と A6 は対頂角の関係で相等しい。問題状況を理解していくことと問題を解決していくことは密接に関連したことなのであるし、学習がその中でまさに生じているのである。概念的知識と手続きの知識、概念的な理解と技能的行動とは密接にからんでおり、学習の問題の解明にとって、そのからみ様がいかなるものであるのかの分析は大変に重要な貢献をなしうるのである。

## 2. 知識の獲得としての学習

1970年代においては、知識の組織化の面に焦点が合わされ、学習がいかに生ずるかということよりも、学習されるものは何かという問題に注意が向いていた。しかし、学習の結果に関して、全く新しい知見が積み重ねられた1980年代に入り、新たに学習の問題を検討しようとする動きが出てきた。新たな学習の理論は様々な知識の構造が獲得される過程の分析を含まなければならない。また学習は、情報や手続きを貯えるための過程だけでなく、それらの情報や手続きを組織し、統合するための過程を含まなければならない。

そのような学習の理論の解明は緒に就いたばかりである。ただ、すでに

指摘しておいたように、言語の理解にせよ、問題の解決にせよ、初歩的な学習を含んでいるのである。文を理解すれば、新しい情報が記憶に貯えられる。問題を解けば、問題状況についての情報やそこでの目標や手続きについての情報が記憶に貯えられる。これらの学習は、ある新しい個別の情報、すでにもっている一般的な認知構造に適合する形で獲得されるものであり、一種の「同化」である。より重要で難しい問題は、理解に使われる一般的なスキーマや問題解決に使われる一般的な手続き的知識がどのようにして変更されていくのかである。

### 3. エキスパート化としての学習

知識構造が変容し、より秀れたものになること、つまりよく理解できるようになり、問題を上手に速く解けるようになること、これは何らかの課題に関して熟達していく過程でもある。この初心者 (novice) がエキスパート (expert) になる過程を学習の1つの中心と見なすことができる。その過程を探る前に、まず、初心者とエキスパートの知識構造の違いを十分に明らかにしなければならない。

J. Larkin ら [1980] は、物理の問題解決についてエキスパートと初心者の違いを明らかにしている。運動学の次のような問題を考えてほしい。

弾丸が 400 m/sec の速度で銃の銃口を離れる。銃身の長さは 0.5 m である。弾丸は一様に加速されているとして、銃身内で弾丸の平均速度はどの位か。

エキスパートは数学的技能に熟達し、力学についての問題を解く経験を広くもっている。初心者は代数についてはかなりの技能をもっているが、運動学は学んだばかりで、このような問題は初めてだとする。両者の解き方にはどのような違いが見られるだろうか。まず、明らかに違うのは、解く速さと正確さである。エキスパートの方が初心者の4分の1以下で解き、誤りも少ない。

第2の違いはこうである。初心者は大部分の問題を、未知の見出すべき

問題解法から後向きに与えられた量へ至るように作業していくことで解く。ところが、エキスパートは普通、与えられた量から望まれる量へと前向きに作業していく。後向きに作業する方がより進んだ解決の仕方なのだから、妙に感ぜられるかもしれないが、実はそのようなことはない。エキスパートは易しい問題に関してだけ前向きに解いているのである。多くの経験を積んでいるために、初め未知の量についての知識を作り出していくだけで問題が解けることがわかり、そこで、そのように解いている。初心者には、経験が少ないため、いちいち目標を下位目標に分析し、それとの対応で問題を解いているのである。当然、時間もかかるし、間違いの可能性も増す。

エキスパートと初心者の問題解決の仕方を「プロダクション・システム」で表わすと、ただ1つ重要な点で異なる。エキスパートのシステムの場合、行為の規則はこうである。もし等式の独立変数の値がわかっているならば(条件)、従属変数について解くことを試みよう(行為)。初心者のシステムの場合、こうである。もし等式の従属変数が望まれる量であるならば(条件)、等式を解くことを試みよう(行為)。もし独立変数のどれかの値が知られていなければ(条件)、その変数の値を見出す目標を作り出せ(行為)。

第3の違い。初心者は、これから使おうとする等式をまず述べ、それから独立変数の値を代入する。エキスパートは、代入の結果の数を言うだけで、元になる等式については何も言わない。エキスパートは解くのが速すぎて、ことばが追いつかないだけかもしれないが、もっとありそうなこととしてこう考えられる。エキスパートは、既知の値から望まれている値を得るための全体の手続きを直接的に、多分1つのプロダクションとして、貯えている。初心者は、それに対し、特定の等式がある変数の値を得るために使えるのだという知識を貯えている。そこでまず等式を認知し、次に変数に値を代入し、等式を解くのである。初心者は、等式をながめ、そこからどのような情報が得られるかを考え、達成されていない目標との関係で評価するのである。ステップごとに、「つぎには何をするのか」を考え

なければならない。そこには数多くのテストの過程が含まれている。

計算機用語を使って言うと、初心者は、コントロール・システムが解釈をしながら、実行していく。エキスパートは、各ステップをまとめて1つにし、コンパイルの形で実行するのである。後者の方が10倍は速くなる。

第4の違い。初心者は、問題を理解するのに、直接的な文法的翻訳の過程をしばしば用いる。他方、エキスパートは、ある種の物理的表現を作り出す。当然、この方が意味的解釈が容易である。

この最後の点を動力学の問題解決の分析で見ることができる。図7に問

図7 簡単な動力学の問題。ブロックBは重さ160ポンドである。そのブロックと机の間の静まざつ係数は0.25である。システムが均衡しているとして、ブロックAの最大の重さを求めよ [Larkin *et al.*, 1980 より]

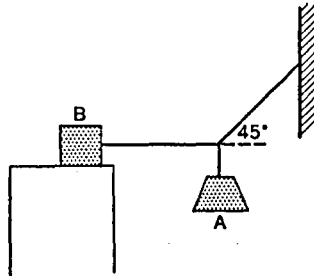


図8 図7の問題状況を記述する構造のいくつつか [Larkin *et al.*, 1980 より]

|     |          |      |        |
|-----|----------|------|--------|
| 名前  | 前: ブロックB | 名前   | 前: 接触2 |
| 型   | : 物      | 型    | : 接触   |
| 下位型 | : ブロック   | 下位型  | : 表面   |
| 質量  | : 160    | 物    | : B, 机 |
| 動き  | : なし     | 質    | : 荒い   |
| 接触  | :        | 静まざつ | : 0.25 |
|     | 右: 1 ひも  |      |        |
|     | 下: 2 机   |      |        |

題を、図8にエキスパートが行なうはずの問題状況をスキーマの一変形であるフレーム [Minsky, 1975] で表現したものの一部を示した。このような抽象的表現により、問題への質的アプローチが適切かどうかすぐに判断できる。また、働いている力やエネルギーを見出し、問題のすべての部分で一樣に表現できる。そうして、力やエネルギーの発見と等式の生成を分離でき、一度に注目しなければならない情報の量を減らすことができる。

このような分析を受けて、Chi, Glaser & Rees [1982] は、物理学のエキスパートと初心者の知識構造の違いについて更につっこんだ検討をしている。特に、彼らは、プロトコル分析以外に様々な実験的手法を用いている点が注目される。

この研究では、問題解決の過程の初期によく生ずる、問題の「質的分析」を取りあげて分析し、そのことによって問題の表現がどのようになされるかを探っている。様々な問題を分類する課題の分析から、初心者は問題の表現にいろいろな困難をもっていることがわかった。その原因は彼らの知識の組織の仕方にある。その知識は、問題の記述文で明示的に述べられているような、主たる物（例、傾斜面）や物理学的概念（例、まさつ）を中心として組織されている。それに対し、エキスパートの知識は、物理学の基本的な原則（例、エネルギーの保存）をめぐる組織されている。この原則は、問題文に明示的に述べられていないが、そこから引き出される。つまり、質的分析において、エキスパートは、初心者と比べ、問題の根底にある原則を見てとることにより、問題をより良く理解するのである。

事実、エキスパートの方が原則をよりよく把握していることは、教科書の一章を要約させたり、分類の理由を尋ねたりすることにより確かめられている。

別な言い方をすれば、エキスパートのスキーマは、宣言的な知識も手続き的な知識も含んでおり、しかも、適用の基準が明確である。初心者の場合、スキーマは宣言的知識についてはかなりのものを含んでいるが、そこから解決方法・手続きを引き出せないのである。



表 1 プロトコルから得られたエキスパートのプロダクション[Chi et al., 1982]

## M. S.

1. もし問題に傾斜面があるならば、そのとき、
  - a. 何かが転がりあるはずべて、上るか下るかするだろう。
  - b.  $F=MA$  を使え。
  - c. ニュートンの第三法則を使え。
2. もし面がなめらかならば、そのとき、機械エネルギーの保存則を使え。
3. もし面がなめらかでないならば、そのときまさつによりなされる仕事を使え。
4. もし問題において物がひもで結ばれて、一方の物が他方のひもにより引っぱられているならば、そのとき、ひもの張力を考えよ。
5. もしひもが張っていないければ、そのとき、物体は独立であると考えよ。

## M. G.

1. (もし問題に傾斜面があるならば、) そのとき、
  - a. ニュートンの法則を使え。
  - b. 力の図を描け。
2. (もし問題に傾斜面があるならば、) そのとき、エネルギーの保存則を使え。
3. もし面に何かがあるならば、そのとき、まさつがあるかどうかを決定せよ。
4. もしまさつがあるならば、そのとき、まさつを図にかき入れよ。
5. (もし図を描くならば、) そのとき、すべての力を書き入れよ——重力、抗力、まさつ力、反作用力。
6. (もしすべての力が図にあれば、) そのとき、ニュートンの法則を書く。
7. もし釣合いの問題ならば、そのとき、
  - a.  $\Sigma F=0$
  - b. 座標軸を定めよ。
8. もし加速度が関与していれば、そのとき、  
 $F=MA$  を使え。
9. もし「用意ができた」ならば (図を描き、力を書き入れ、軸を定めたならば)、そのとき、力の各要素を足せ。

(注) 表のかっこの中の記述は被験者がはっきりと述べたことではないが、文脈からそれと知れるものである。

一例を挙げよう。表1, 2に、エキスパートと初心者が力学の概念を説明したものをプロダクション・ルールで表わしてある。エキスパートのプロトコルでは原則に明示的に言及している。しかも、この原則は手続きに組みこまれている。適用条件をはっきりさせていることでそれがわかる。

表 2. プロトコルから得られた初心者のプロダクション [Chi *et al.*, 1982]

|  |
|--|
| H. P.  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. (もし問題に傾斜面があれば,) そのとき水平面に対しての面の角度を見出せ。</li> <li>2. もしブロックが面に静止していれば, そのとき,             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. ブロックの質量を見出せ。</li> <li>b. 面にまさつがあるかどうかを決定せよ。</li> </ol> </li> <li>3. もし面にまさつがあれば, そのとき, 静まさつと動まさつの係数を決定せよ。</li> <li>4. もしブロックに力があるならば, そのとき, ……</li> <li>5. もしブロックが静止しているならば, そのとき, ……</li> <li>6. もしブロックに初期速度があるならば, そのとき, ……</li> <li>7. もし面にまさつがないならば, そのとき, 問題は単純化される。</li> <li>8. もし問題がエネルギーの保存則に関わり, ブロックの高さと面の長さとの高さがわかっているならば, そのとき, 位置および運動エネルギーについて解けるだろう。</li> </ol>     |
| P. D.  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. (もし問題に傾斜面があるならば,) そのとき,             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. どのような型の仕組が使われているかを見出せ。</li> <li>b. どの質量が与えられているかを見出せ。</li> <li>c. 滑車から来る力以外の外力を見出せ。</li> </ol> </li> <li>2. もし滑車に関わっているならば, そのとき, 無視するようにせよ。</li> <li>3. もしまさつ係数を見出そうとするならば, そのとき, 徐々に角度を増して面上のブロックが動き始めるようにせよ。</li> <li>4. もし2つのまさつのない傾斜面が互いに向き合っており, ボールが一方の高い所から転がれば, そのとき, ボールは他方の同じ高さの所にまで転がっていく。</li> <li>5. もし何かがまさつのない面をすべり落ちれば, そのとき, 三角関数を用いて重力の傾斜面における加速度を見出すとよい。</li> <li>6. もし衝突が必要ならば, 斜面を用いて1つの物体を加速するとよい。</li> </ol> |

また, 問題の表層的な特徴にもエキスパートは言及しており, これは初心者と共通する。エキスパートはそれに加えて, 物理学的法則に基づく解決手続きに関する知識をもっているのである。

また, 別の面での違いとして, 物をどう位置づけるかの違いも指摘できる。初心者は, 傾斜面を, 行為の系列の中に位置づけず, 空間的, 機能的な関係としてとらえる。それに対し, エキスパートは, 潜在的に可能な諸

諸の解決手続きの文脈に傾斜面を位置づけるのである。

初心者 H. P. のプロトコルをよく見ると、エネルギーの保存に言及している（表 2 の規則 8）。これは上の記述に対する例外のように見えるが、そうではない。同じエネルギーの保存則に言及しているエキスパート（表 1 の M. S. の規則 2, M. G. の規則 2）と比べてみよう。初心者の場合、プロダクション・ルールの条件側の一部になっている。エキスパートの場合には、共に、プロダクション・ルールの行為側に入っている。すなわち、エキスパートの方が、手続きの適用条件がより明確なのであり、問題を解く際に原則を利用できるのである。

さて、ではどのようにして初心者はエキスパートになっていくのであろうか。エキスパートになる学習の過程はどのようなものか。

その過程を示す有望なモデルが、適応プロダクション・システム (APS) である。APS は、新しいプロダクションを作り出し、そのプロダクションを自らに組み入れて、成長していくものである。

新しいプロダクションは、もちろん直接に教授されることもある。それ以外に、特に重要な方略として、「例によって学ぶ (learning by example)」ことと「することによって学ぶ (learning by doing)」ことが考えられる。

#### 4. 例によって学ぶ

D. M. Neves [1978] は、「例によって学ぶ」仕方を検討している。次のような 1 次方程式の解を見てほしい。

$$3x+4=x-12$$

$$2x+4=-12$$

$$2x=-16$$

$$x=-8$$

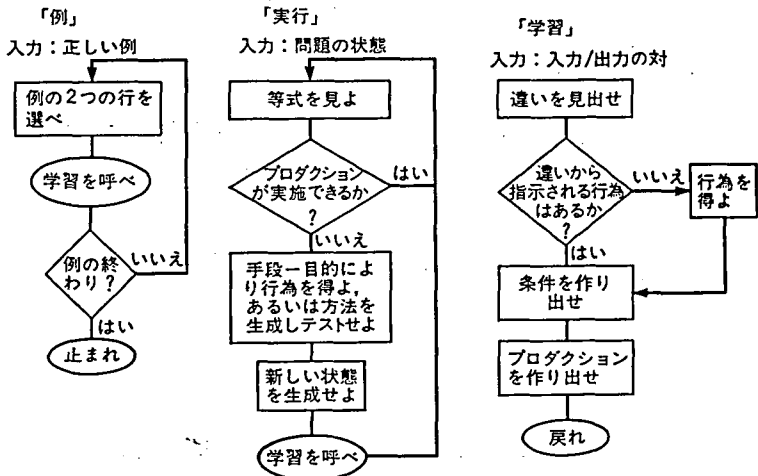
このような解の例を見て、学習者は何を学ぶのかが、「例によって学ぶ」ことの問題である。

Neves はこの問題を計算機シミュレーションにより解析している。図9に、学習の結果となるべき、1次方程式の「操作子 (operator)」の理解がプロダクション・システムの形で示されている。要するに、 $x$  の答えを見出すために、どのように移項等をすればよいかの理解である。図10にプログラムの流れ図を示した。「例」のプログラムは、正しい例を入力とし、続きの2行を「学習」へ送る。「学習」は要するに、第1行を入力、第2行を出力とするように、何らかの操作子が働いたのだと解釈する。まず、2行の違いを見出す。記号の何が、除かれたか (rem), 加えられたか (add),

図9 代数のためのプロダクションシステム [Neves, 1978 より]

1. もし等式の左側に数があれば、それを両側から引け。
2. もし右側に“ $x$ ”を含む項があれば、それを両側から引け。
3. もし左側に2つの同種の項があれば、それを加えよ。
4. もし右側に2つの同種の項があれば、それを加えよ。
5. もし等式が“ $\langle \text{数} \rangle * x = \langle \text{数} \rangle$ ”という形になったならば、両側を“ $x$ ”の前にある数で割れ。
6. もし等式が“ $x = \langle \text{数} \rangle$ ”という形になったならば、止まれ。

図10 3つのプログラムの流れ図 [Neves, 1978 より]



変換されたか (trans) を表現するのである。次に、違いを一般化する。たとえば、数について一般化する。(left -3) は (left - $n$ ) となる。

$$x-3=5$$

$$x=8$$

違いはこうなる。

$$(\text{rem (left-}n\text{)}) (\text{trans (right+}n\text{)}) (\text{add (right+}n\text{)})$$

すでに、「加え、単純化せよ」(ADD-AND-SIMPLIFY) という操作子を学んでいれば、それによりこの違いを作れることがつぎに見出せる。

ここで、2つの発見法を導入しておく。

- (1) もし環境への行為の結果が観察されるならば、その行為の条件はおそらくその行為により影響された記号群である。
- (2) 変化を受けた記号の一部だけが行為の条件として用いられる。変化の種類により何が条件に入ることが変わる。たとえば、違いに rem があれば、除かれた記号だけが条件に入る。

その結果、新しくプロダクションが作り出される。すなわち、

$$(\text{left -}n\text{)} \longrightarrow \text{ADD-AND-SIMPLIFY (}n\text{)}$$

となる。

もし適当な操作子を自らのシステム内にもっていないときには、別の手続きで操作子を見出さなければならない。

- (1) 教授者に手続きの名前を尋ねる。
- (2) 行為のための原始的操作子を用いる (記号を環境に加える, 除く, 別の記号に変換するという一般的行為)。
- (3) 間をとんだステップを埋めるために目的-手段分析を用いる。
- (4) 違いについて部分的-一致を用いる。
- (5) 別の表現をたためす。

以上の「学習」のプログラムに対し、「実行」のプログラムは、いくつかの例をこなした後、テスト問題に取り組む部分である。学習したプロダクションを用い、あるところでうまくいかなければ、目的-手段分析で行為を得て、「学習」に戻ってプロダクションをまた作り出すことになる。

このシステムでは、たえず例の2行を対にして、その間の変換・生成を考え、プロダクションを形成し、自らの内に加えていき、次にはそのプロダクションを含めて利用し、また学習していくのである。

## 5. することによって学ぶ

つぎに、「することによる学習」の解析を取りあげよう。Y. Anzai & H. A. Simon [1979] は1人の人の「ハノイの塔」の解き方を分析して、理論化を行なっている。5つの円盤を使ったハノイの塔の問題は次のとおりである。

板の上に3本の棒が立っている。左から右へ棒A, B, Cと名づける。それぞれ異なった大きさの5つの円盤が、小が大の上に来るようにして、棒Aにささっている。課題は、それらの円盤を一時に1つずつ元の棒から別の棒へ動かすことにより、棒Cへ移すことである。その際、次の規則を守らなくてはいけない。(a) 小さい円盤の上に大きい円盤を乗せることはできない。(b) 上に円盤の乗っているまま、下の円盤を動かすことはできない。

このハノイの塔の問題では、多くの解き方の方略があることがわかっていいる。より良い、しかし初めは気づきにくい方略へ、どのように移っていくかが分析の要である。

1時間半にわたっての解き方を分析してみると、4つのエピソードに分けられた。それは4種の解答への試みに対応している。第1エピソード(E1)では、「選択的探索方略(selective search strategy)」を用いていた。これは明らかに無駄な動き(たとえば円盤を別の棒に動かしまた戻す、同じ円盤を別の棒に動かし続けて第3の棒へ動かす、など)をしない

ことで成り立つ。しかし、ここでは完全に解くまでに至らなかった。第2エピソード(E2)では、中間の目標を立てていく。一番大きい円盤をCに動かし、次に大きいのをその次にCに動かし、……と考える。これは「目標一棒方略(goal-peg strategy)」である。第3エピソード(E3)では、1つの円盤の問題、2つの円盤の問題、3つの円盤の問題というように、くりかえし再帰的に規則を適用することで5つの円盤の場合も解けることに気づいた。これは「再帰的下位目標方略(recursive subgoal strategy)」とよばれる。第4エピソード(E4)では、先程の下位目標が実は円盤のまとり(=ピラミッド)を動かすことだと気づく。「ピラミッド下位目標(pyramid subgoal strategy)」である。

以上の分析(とより詳細なプロトコルの分析と)から、次のことがわかる。

- (1) 4つの方略を続けて生み出している。
- (2) 以前の試行で得られた情報が長期記憶に貯えられ、方略の変更の手がかりとして用いられている。最後(E4)の場合は知覚の手がかりが重要だろう。
- (3) 短期記憶は主に下位目標を貯えるのに用いられる。
- (4) 各エピソードで、4種類の過程が見られる。現在の方略の適用、後に方略の修正に使われる情報の収集、以前のエピソードで収集された情報の使用、解決の試みを終える決定。
- (5) かなり意識的な方略の変更(E1とE2の間、E2とE3の間)と、あまり意識的でない方略の変更(E1内、E4内)とが見られる。前者は、概念的な、後者は知覚的な、学習過程であろう。

次に、各エピソードでの方略の使用をプロダクション・システムで表わした結果、各方略の構成や違いが明らかにされた。さらに、この問題を解く以前からもっていた一般的学習能力や方略についての知識も明らかになってきた。問題を解くときに得られた情報と以前の知識とが結合されて、学習に寄与する仕方に、次の5通りが推定できる。

- (1) 選択的探索の段階。必要な予備知識は無駄なくくりかえしは避けるといふものである。そのためには、前2回の動きを覚えている必要がある。さらに選択的探索ができるようになると、将来の動きの予測 (look ahead) が容易になって、下位目標を生み出しやすくなる。
- (2) 下位目標の組織。目的-手段 (means-ends) 分析が重要な予備知識である。これによって、将来から現在を見ること (look backwards) が可能となる。
- (3) 動きのチャンク化 (まとまり)。小さい円盤3つを動かすのは特にチャンク化されやすい。実際には、E3の半ばで現われた。特に、動きを邪魔する円盤に気づくことで、成立している。
- (4) 目標の重なりや円盤のまとまりを動かすこと概念。動きを邪魔する円盤のまとまりに気づき、それが、「ピラミッド」に気づくことを促している。ピラミッド下位目標方略にとって、一連の目標の重なり概念に気づくことが重要である。つまり、下位目標のチャンク化が必要なのである。
- (5) 方略学習における知覚。3つの基本的な知覚的弁別——2つの棒の違い、円盤の大小の違い、特定の円盤が特定の棒にあること——が必要。3番目が時間と共に変わっていく。これは情報収集にとって重要な役割を果たす。

以上の分析に基づいて、適応プロダクション・システムを作る。学習についての基本的仮定はこうである。

- (1) 自分が選択した動きの有効性についての知識を獲得する能力と自らを修正するためにその知識を用いる能力とをもつ。結果の知識には、悪い結果と良い結果の認識がある。悪い結果には、たとえば、無駄な動きをした場合が含まれる。良い結果の認識には、下位目標の達成の認識が含まれる。
- (2) 悪い結果や良い結果を認識したとき、新しいプロダクションを作り出し、望ましい方向に行動を変えるようそのプロダクションを用いな



ければならない。そのため、悪い結果や良い結果から遡って、それを引き起こしたと考えられる一連の動きのボタンを見出す能力をもつ必要がある。

そのような特性をもった適応プロダクション・システムの作成とシミュレーションから、特定の問題とは独立した一般的学習システムを作り出せることがわかってきた。

悪い動きを避ける（選択的探索）について。いま、P1, P2, P3 を探索の道筋に沿った一続きの状態とし、A1 をP1 からP2 に移る動き、A2 をP2 からP3 へ移る動きだとする。そこで、P1=P3 であるならば、無駄があるので、次のプロダクションを作り出す。

(PAST-MOVE A1) → (EXCLUDE A2)

つまり、A1 をしたら次にA2 はしない。なお、システムを考えるときには問題表現における状態や動きの内的構造を知る必要のないということに注意してほしい。単なるラベルにすぎない。

具体的に、ハノイの塔でA1が円盤1を棒CからBへ動かすこと、

(MOVE 1 C B)

だとし、A2が

(MOVE 1 B C)

だとする。ここから、一般化の過程が働く。各関数の引数の型を知り、その知識により一般化するのである。すなわち、

(PAST-MOVE X P Q) → (EXCLUDE (MOVE X Q P))

同様にして、遠まわりを避けるプロダクションも学習される。

(PAST-MOVE X P Q) → (EXCLUDE (MOVE X Q R))

さらに、引数の内容についての問題特有の知識を使えば、たとえば、A1とA2が逆の動きかどうかのテストができる。そこで、ループを避けるプロダクションが作れる。

(PAST-PAST-MOVE A1) (INVERSE A1 A2) → (EXCLUDE A2)

これもまた一般化される。

目標の再帰的方略について。状態P1にあるシステムが目標A2をもち、探索により、一続きの道筋P1, A1, P2, A2 (A1が働いていて、P1からP2に移り、それにさらにA2が働く)を見出したとする。そこで、P1において目標A1を目標A2の下位目標として立てることができる。そこで、次のようなプロダクションを作り出せる。

(CURRENT-STATE P1) (GOAL A2) → (SET (GOAL A1))

ここから、特定の問題環境における合法的な動きについての知識を利用して一般化できる。いま、動きAについてのテストをT1(A), T2(A), T3(A)とする。すると、たとえば、

(CURRENT-TESTS T1 T2 NOT (T3)) (GOAL A2)

→ (SET (GOAL A1))

これもまたさらに一般化できる。

同様に、動きのチャンク化、ピラミッド下位目標方略などについても、学習の過程を想定できる。

この適応プロダクション・システムで重要なことは、特定の1組の問題からは独立した一般的学習能力をもっている人が、問題についての情報を利用してしながら、問題を解きつつ、新たにプロダクションを作り出していき、さらにそれを利用していく点である。そうすることで、「することによって学ぶ」ことが可能になるのである。

## 6. ACT システムにおける学習の機構

つぎに、現在おそらく最も良く整備され、検証されている一般的学習理論として、Anderson の ACT システムをあげることができよう [Anderson, Kline & Beasley, Jr., 1979]。特に、シミュレーションと実験的研究の往復により目覚ましい成果を挙げている。また、ACT の学習システムは、人間のあらゆる場面——子ども、大人を問わず——を扱おうとしている点でも野心的なものである。

ACT システムとは、つぎのようなものである。宣言的(=概念的)知識

と手続き的知識をもち、前者を命題ネットワークで、後者をプロダクション・システムで表わす。プロダクションの条件は活性化され命題で満たされる。ACT のプロダクション・システムの主な特徴を以下に挙げておく。

- (1) 個々のプロダクションは長期記憶内の情報へ働きかける。プロダクションは互いに、記憶の中に情報を入れこむことにより伝達し合う。
- (2) プロダクションは、1つのプロダクションから何らかの要素をデータベースに入れこんだ後に、別のプロダクションが働くという順で適用されていく。そこで、1つのプロダクションの行為が別のプロダクションを引き起こすのに役立つことになる。
- (3) プロダクションの条件は、データベース内の命題の抽象的パタンを含んでいる。条件のパタンに含まれる命題が多ければ、その条件を満たすことは難しくなる。同様に、条件がそのパタンを記述する際に、変数でなく定数に頼れば、その条件を満たすのは難しくなる。

さて、ACT ではどのようにして学習がなされるのか。ACT は、データベースに命題を加えること、プロダクションを加えること、命題やプロダクションの活性化の強さを変えること、により学習する。特に重要なのが、プロダクションを加えることによる学習であるので、以下はこれに話を限る。

プロダクションは2つの仕方データベースに付加できる。1つは、教示の符号化の場合のような、「意識的な指定 (designation)」であり、もう1つは、経験に応じた自発的なプロダクションの再構造化である。後者は、一般化と分化を含んでいる。さらに、結果のフィードバックに応じた、プロダクションの活性化の強さの変更が重要な役割を果たす。

#### (1) 指 定

プロダクションは他のプロダクションにより指定できる。たとえば、次のような LISP の規則が与えられたとする。

ルール 1: もしある表現が数であれば、その表現はアトムである。

このルールは次の2つのプロダクションによって、プロダクションに翻訳することができる。

P9 もし「ある表現が LV 語 であるならば……」で始まる文があり、LV 概念が LV 語 の概念であるならば、「ある物は LV 概念 である」を新しい条件に置き (LV は局所変数であることを示す)。

P10 もしその文が「……それは LV 語 である」で終わり、LV 概念が LV 語 の概念であり、LV 条件が新しく置かれた条件であるならば、「もし LV 条件が成り立てば、それは LV 概念 である」というプロダクションを作れ。

この2つのプロダクションにより、先程のルールは次のプロダクションに変えられる。

P13 もしある物が②数であるならば、それは②アトムである。

このような指定の過程が、いかなる学習状況でもプロダクションをシステムへもちこむ最初的手段として働く。

## (2) 一般化

プロダクションが1つ指定されるとすぐに、すでに活性化されているすべてのプロダクションと共に一般化されていく。一般化は、2つのプロダクションで異なっている定数を変数で置きかえることにより生ずる。ただし、2つのプロダクションの一般化が実際に生ずるのは、両者が同じ行為をもち、置きかえられるべき定数が、定数の少ない方のプロダクションで定数全体の半分までのときに限る。たとえば、初めの2つのプロダクションから第3のプロダクションへと一般化される。

P16 もし三角が丸の右にあり、四角がハートの右にあり、第1の対が第2の対の上にあれば、これは学習材料の1事例である（下線は定数であることを示す）。

P17 もし丸が三角の右にあり、四角がハートの右にあり、第1の対が第2の対の上にあれば、これは学習材料の1事例である。

P18 もし LV 形1 が LV 形2 の右にあり、四角がハートの右にあり、

第1の対が第2の対の上であれば、これは学習材料の1事例である。

### (3) 分 化

もしあるプロダクションが正しい適用と間違っただ適用の双方の記録をもてば、分化がなされる。分化は、プロダクションの1つの変数に、正しい適用のときにその変数がもち、間違っただ適用のときにはもっていない値を入れることにより形成される。たとえば、初めの2つのプロダクションから第3のプロダクションが一般化される。

P23 もし刺激が2つの大きな赤い三角をもてば、それはカテゴリーAに入る。

P24 もし刺激が2つの大きな青い丸をもてば、それはカテゴリーAに入る。

P25 もし刺激が2つの大きな LV 色、LV 形をもてば、それはカテゴリーAに入る。

ところが、反例として、カテゴリーBに入る刺激、2つの大きな青い三角、を示されたとする。P25が間違えているので、分化が生じ、次の2つのプロダクションが形成される。

P26 もし刺激が2つの大きな赤い LV 形をもてば、それはカテゴリーAに入る。

P27 もし刺激が2つの大きな LV 色の丸をもてば、それはカテゴリーAに入る。

なお、こうして分化しても元のプロダクションが消されるわけではない。もし共に活性化され選択されたならば、より特殊な方が適用されるという原則が適用されるという原則が立てられている。

### (4) プロダクションの活性化の強さの変更

プロダクションが作られると、ある強さが与えられる。そのプロダクションを再び作り出す試みがあるたびに、強さが増す。プロダクションが適用されるたびに強さが増す。あるプロダクションと行為が同じで、条件がより広いプロダクションについて同様のことが生ずると、同じ強さ分だけ

元のプロダクションも増す（強さが上部から下位へと広がる）。プロダクションが間違っただけで適用されると、その力は著しく減る。下位のも同様に減る。このようにしてプロダクションの強さ（活性化の程度）はたえず変化している。プロダクションの条件が満たされているものの内、ある程度以上の強さのプロダクションだけが選択される。さらに、そのようなプロダクションが2つあり、1つの方が特殊であれば、それが適用される。以上を実際にシミュレートする場合には、おのおののパラメータに適当に値を入れることになる。

以上のような ACT の学習システムは、実際に、プロトタイプ形成ないしスキーマ抽出の実験をシミュレートすることによって、データと対応づけられている。そのシミュレーションで用いられるプロダクションは一部を例で示したので、見当がつくかと思う。この実験事態は、一種の概念形成の実験であるが、学ぶべき「ルール」ははるかに複雑で、たとえば、線形の判別関数で定義されるようなものである。そこまで、ACT がかなりの成功を収めた（少なくともこれまでのモデルと同様に）のは、ACT の学習モデルとしての成功の見込みを実証するものである。特に、この実験事態での他のモデルと異なり、様々な場面での学習に ACT は適用可能であるからである。

## 7. ACT システムの発展

ACT システムはその後さらに発展し、より包括的な学習モデルとなりつつある (Anderson, 1982; Anderson, Greeno, Kline, & Neves, 1981; Neves & Anderson, 1981)。特に、Anderson [1982] では、学習過程の全般にわたるモデルを立て、多くの現象を説明している。

ここでは、認知技能の獲得を3つの段階に分けて考えている。宣言的段階、知識のコンパイルの段階、手続き的段階である。これらの段階をへて、初心者がエキスパートになっていくと考えられる。また、各々の段階で、学習の機構は違うものとされる。

段階の詳細に入る前に、ACT システムの特徴について、前項の説明に加えて強調しておきたいのは、システムにおいて目標構造が大変重要な働きをしている点である。プロダクションはいくつかが集まって、サブルーチンをなすと見なせる。各サブルーチンは、各々、そのサブルーチン内のプロダクションが達成しようとする1つの目標状態と結びついている。システムは一時に1つの目標をもつただから、一時にあるサブルーチンの中の1つのプロダクションが働いていることになる。このことにより、システムの行動に系列性が生じる。また、目標間の関連から、階層的な構造も作り出されている。

まず、宣言的段階について見てみよう。ある種の問題に初めて接する学習者を考える。すると、その問題の記述と教示には宣言的情報が含まれている。その情報を、学習者がすでにもっている一般的な問題解決手続きが解釈していき、その問題の解決のためのプロダクションを形成していく。

ここで注目されるのは、与えられる宣言的知識とプロダクションないし実行手続きとの間に解釈システムが介在する点である。これは効率が悪いけれども、逆に、新しい知識に基づくプロダクションがシステムの目標にとって確かに望ましいかどうかチェックすることを易しくする。初期学習がゆっくりしたベースである事実にも対応している。なお、この解釈システムの導入により、前項でも述べた「指定」(この場合、プロダクションが直接に生成される)は用いられなくなった。指定の過程は、人間の学習を考えると、強力すぎるのである。

次に、知識のコンパイルの段階について。宣言的情報は作業記憶の容量に大きな負荷を与える。そこで、その負荷を減らすため、解釈の働きのなしに、直接に知識に適用されるプロダクションへと移る必要がある。これが、知識のコンパイルである。2つの下位過程がある。1つは、合成 (composition) で、同一の目標に関連して続けて生じるプロダクションを1つのプロダクションにまとめるものである。もう1つは、手続き化 (proceduralization) で、領域固有で特殊な情報をプロダクションに組みこんで、い

ちいち長期記憶からよび出す必要をなくすものである。

このコンパイルの過程は、過去のシステムの行動において成功したプロダクション系列を効率よく実行できるようにするものである。宣言的知識の中で、試されてシステムの目標にとって有効だったものだけを効率化するのである。

最後に、手続きの段階が来る。ここでは、いわば、様々なプロダクション間の調整 (tuning) が行なわれる。その機構は、前項で説明した、一般化、分化、活性化の強さの変更の3つである。

以上、ACT システムにおいては、宣言的知識と手続きの知識がはっきりと分けられているが、プロダクションにおける変数の扱い、目標構造への言及、解釈システムの介在、により両者は有機的に結びつけられ、問題解決および学習に対し、総合的な働きをなすのである。

## 8. 現実的な学習へ

前節では、エキスパートの初心者の違いから出発して、エキスパート化の過程のモデルのいくつかを説明した。エキスパート化の研究は、このように豊かな結果をもたらしつつあるが、同時にそのもう1つの面は、より現実的な学習事態を取りあげようという志向である。物理学、幾何などはしばしば取りあげられている。本節では、そのような現実的な学習の分析へ焦点をあて、特に、心理学的な研究の可能性を見てみたい。いくつか代表的な研究を取りあげることにより、今後への展望を探りたいと思う。

### 8.1. 足し算と引き算

すでに、Brown & Burton [1978] による引き算の誤り (バグ) の分析については触れた。この研究を初めとして、近年、足し算、引き算については多くの優れた研究がなされている [T. P. Carpenter, J. M. Moser & T. A. Romberg, 1982]。旧来の数学学習の研究と最近の認知心理学とが結びつくことにより、理論的にも、教育実践上からも優れた成果が出てい



る。

Brown & Burton [1978] によって見出されたバグは、普通の大人には想像もできないようなものに満ちている。例えば、ケタ毎に大きい数字から小さな数字を引くとか、0から借りるときに、0を9に変えるが、さらにその上のケタへ行かないとか、0からNを引くときには必ずN（あるいは0）にするとか。これらは比較的好くあるバグである。

では、一体どうしてこのようなバグが生じてくるのであろうか。もちろん、誰もわざわざバグを教えたりはしない。正しいやり方を教えているはずである。Brown & VanLehn [1980] はこの問題に取り組んでいる。

今、引き算の手続き的知識が正しく学習者に与えられたとする。ところが、学習者は、正しい規則の一部を忘れていたり、あるいはそもそも学習しそこなっていたりする。つまり、規則の一部が存在しない。不完全なままに、その手続きに従って実行しようとする、そこでまずバグとなってしまう場合がある。しかし、大概は、すぐにバグとはならず、実行が行きづまってしまふ。何とか引き算の答えに見えるものを出そうとするのだが、出せなくなる。そこで何とか答えを出すために、間に合わせ (repair) に手続きを変えていく。その変え方は、例えば、困難を引き起こした行為をスキップして、その次の手続きに行く。縦方向に入れかえてやってみる（これにより、例えば、大きい数字から小さい数字を引くバグが出てくる）。同じような状況でうまくいったやり方を試してみる。指で数えるような原始的なやり方に戻る。これらの間に合わせの発見法を用いて、子どもは実際に様々のバグを発明しているらしい。もっとも、あまりに馬鹿げたバグは産出しないように、チェックの機構もあるようだ。例えば、答えの数値の間に空白があるとか、1つのケタに2つの数字を書くとかは決して生じないから、そのようなバグは仮に生成されてもすぐに消去されるのだろう。

この理論によって、すべてのバグの生成が説明される訳ではないが、少なからぬ部分が予測できた。

ともあれ、このバグの生成の間に合わせ理論においては、バグの原因

を、子どもが実行困難に陥ったときに、何とか工夫して問題を解決しようとする仕方に求めている点が興味深い。多くの子どもにとって不幸なことに、この引き算のような、手続きが固定的なものの場合には、そのような創造的工夫は裏目に出て誤りを生み出してしまうのである。

では、そもそもこのような誤り、行きづまりに子どもを導かないような教え方はないものだろうか。そのような提案の内、特に興味深いものが、VanLehn & Brown [1980] と Resnick [1982] である。

VanLehn & Brown [1980] は、手続きはどのようにして意味をになうようになるのかと問う。手続きの各部分はどうのような目的をもっており、各部分がどのように協働するのかを知ることが手続きを真に生かすために重要なのである。そのような手続きの意味ないし目的を学習者が理解できるようにするにはどうしたらよいか。様々な関連する手続きの間にアナロジーを立て、より原始的な手続きからより進んだ手続きへの対応を示す。2つの手続きの間の違いは、最終的に獲得されるべき手続きに必要な制約の1つを前者がもたず、後者がもつという点である。つまり、1つ1つ制約を導入していく。その際、大事なことは、その制約を導入したことにより、今行なっている操作がより速く、あるいはより簡単に、より間違えずに出来るようになったということが学習者に実感されることである。その制約が何のために存在するのかがそのことにより把握される。

例えば、計算において、重要だが、なかなか理解しにくい制約に、“正規性 (canonicity)” の原則がある。この原則は、数の表現と数とを1対1対応させることである。11という数は、1通りにしか表記されない。ところが、タイル (Dienes Blocks) では、この原則は必ずしも守られていない。11を1の単位を11個としてもよいし、10の単位と1の単位を合わせてもよい。くりあがり (carrying) もまた子どもたちにとって大変わかりにくい事柄であるが、実は、これは、正規性の制約を維持する必要から出てきたと考えるとわかる。そこで、正規性が導入された後、くりあがりを導入すれば、くりあがりの目的はよく理解されるだろう。

では、正規性そのものの目的はどのように理解されるか。2つの大きな数の比較を考えてみればよい。もし正規性が導入されておらず、大きな数にいろいろな表わし方があったならば、2つの数が違う場合になかなか気づきにくい。正規性が導入されると、違うことはすぐにわかり、効率が良いことが実感できる。これを、ブロックを用いて示せばよい。

このようにして、VanLehn & Brown は、引き算について、初めの1の単位のブロックだけを使って1対1対応で行なうやり方から、筆算による通常の引き算までの移行の案を提示している。(なお、彼らは、計画 ネット planning net の表現を用いて厳密な分析をしており、これも注目される。)

Resnick [1982] もまた、いかにしてバグを生じないように教えるかについての提案を行なっている。彼女によると、引き算のような計算は、その統語的、アルゴリズム的な部分と、その意味的な部分とに分けられる。バグは、実行の困難に陥ったとき、統語的な部分をあくまで順守して、意味的な部分を無視しがちなために、しばしば生ずる。例えば、ケタ毎に大きな数字から小さな数字を引くというバグは、借りるという操作以外のすべての統語を守っている。ところが、引き算というのは、上の数全体から下の数の全体を引くのだという制約を破っている。ケタに分けて表記してあっても、それは別々の数字の連鎖ではなく、1つの数を表わしているのだという意味が忘れられているのである。

それでは、どのようにしたら、意味が忘れられてしまわないようにできるか。それには、統語的知識と意味的知識とをもっと明瞭に結びつけて教えればよい。子どもが、ブロックの操作についてはよくわかっているとすれば、ブロックの操作と筆算とを1つ1つ対応づけて示してやればよい。同じ問題を2つのやり方で平行して交互に解いていくのである。すると、筆算はブロックの動きを記憶することになるし、ブロックは筆算の仕方の理由を提供することになる。それと共に、教授者は、なぜそのステップがなされるのかの理由をていねいに説明してやる。

例えば、

300-139

という問題で、子どもはまず、100のブロックを3個並べ、筆算の問題もタテに書く。次に、100のブロック1個を10のブロック10個に換え、それを筆算に表記する。次に、10のブロック1個を1のブロック10個に換え、やはり筆算に表記。最後に、ブロックの対応する各単位 (denomination) 毎に、下に表わされている分だけ上から除いて、筆算で各ケタ毎に残った数を表わす。

このようにして、子どもたちは筆算のアルゴリズムの意味を学び、考えていく。そもそもこの対応により、間違っただけの操作が発生する可能性は減るし、さらに、ブロックにおいて元々もっていた知識構造を新たに学ぶ筆算へと結びつけることにより、筆算が豊かな知識構造へと埋めこまれ、意味制約を無視することがなくなるのである。

## 8.2. 学習における意義

前項では、計算においても、その意味を把握することが大事だということが示唆された。計算のような本来的に手続き的知識でもそうなのだから、文章の理解とか記憶といった領域ではなおさらそうである。語や文の場合、その意味は通常もちろん理解されるに違いない。問題はそれを越えて、何のための語であり、何のための文であるのか、すなわち意義 (significance) の把握にある。

J. D. Bransford *et al.* はその一連の研究で [Bransford, Stein, Vye, Franks, Auble, Mezynski, & Perfetto, 1982; Stein, Bransford, Franks, Owings, Vye, & McGraw, 1982; Stein, Bransford, Franks, Vye, & Perfetto, 1982; Franks, Vye, Auble, Mezynski, Perfetto, Bransford, Stein, & Littlefield, 1982], 学習すべき事柄の意義を理解することが重要であることを強調している。例えば、生物学を初めて学ぶ人にとって、動

脈は静脈と比べより柔軟だという事実は覚えにくい。様々の記憶術的なやり方で覚えられたとしても、そもそもなぜ動脈は柔軟なのかということ把握していない。そうである限りは、初歩的事実の暗記を越えて先に学習は進んでいかない。それに対し、エキスパートはなぜかまでを把握し、知識を全体として関連づけている。動脈は、心臓によって圧力をかけられた血液の急激な流れに応じられ、しかも逆流を許さないように柔軟にできているのである。

意義が学習にとって重要であることを実験的に検討するために、Bransford たちは、小学校5年生の勉強がよくできる子とそうでない子の比較を行なっている。最初の研究では次のような実験をしている。子どもに、例えば、「腹のすいた男が車に乗った」といった文を示し、その文に続けて、その文を理解し、覚えやすくなるようにしてくれと頼む。その後で、「どの男が車に乗ったかな」という形で、手がかり想起がなされる。ポイントは、例えば、「腹のすいた男は車に乗った、レストランに行くために」とするかどうかである。そのような類の精緻化 (elaboration) ならば、なぜ腹のすいた男が車に乗らねばならないかがわかる。それに対し、「腹のすいた男は車に乗った、そしてドライブに行った」では、腹のすいた男が登場する必然性がわからない。結果は、確かに、勉強のできる子の方が、前者のような「有効な (precise)」精緻化を多く行なっており、記憶も良かった。また、勉強のできる子、できない子共に、有効な精緻化をしている場合の方がそうでない場合より想起がよかった。続いての実験では、簡単な訓練を勉強のできない子に行なった。すると、有効な精緻化が増し、それに伴って記憶も向上した。だから、勉強のできない子どもは、有効な精緻化ができないのではなく、自発的にはなかなか実行しないのである。

では、なぜ、そうなのであろうか。1つ考えられることは、勉強のできない子どもは、メタ認知 [Brown, 1978; Markman, 1979] を欠いているのではないかということである。第2の研究においては、確かに、勉強のできる子どもの方が、有効な精緻化が記憶するのに具合が良いことによく

気づいていた。しかも、一度記憶課題を経験すると、益々、勉強のできる子どもとそうでない子どもの違いは目立った。しかし、第2実験で、勉強のできない子どもに適当な訓練を与えると、精緻化について気づくようになった。

第3の研究では、1文ではなく、もう少し長い文章を用いて実験した。その結果、第1に、有効な精緻化がなされている文章の方が理解・記憶しやすい。第2に、ここでも、勉強のできない子どもは、自発的に精緻化しないが、訓練を与えると、するようになるし、その方がよいことに気づく。

以上から、勉強のできない子どもは、自らの学習活動に対し、コントロールを及ぼせるのだということを充分認識しておらず、そのためうまく学習できないこと、とりわけ、学習材料を機械的に暗記するのではなく、その意義を問うていくことをなかなかしないことがわかる。初心者がエキスパートになっていく過程は、単に多くの知識を獲得し、手続きとして自動化してだけでなく、その知識の意義を求めて知識を構造化していく過程であり、同時に、そのことに自覚的になっていく過程でもあるのだ。

このような、学習における意義への注目、またメタ認知との関連は、最近、特に強調されるようになった点である [Brown, Bransford, Ferrara, Campione, 1983]。例えば、Paris, Newman & McVey [1982] は、いろいろな名称の記憶において、記憶方略がどのように有効かを子どもに充分示してやると、記憶も、学習の仕方も、メタ認知も変化し、しかも持続することを示している。

## 9. 発達と学習

もっとも長期的で大きな変化は、発達である。これが学習の過程と違い、どう関連するのかは、昔からの問いである。エキスパート化の研究が進むにつれ、発達もまた、エキスパート化としてみなそうという考えもまた当然出てくる [Chi, 1978]。しかし、発達においては、成熟の要因が関与するというだけでなく、現在のエキスパート化の理論をはるかに越える

変化が生じているように思えるから、簡単には、発達をエキスパート化とは見なせないかもしれない。いずれにせよ、エキスパート化と発達とを結びつけていくことによる発見はすでにあるし、今後も展開していくに違いない。その際、1つ特に重要な研究の流れがピアジェ派の仕事である〔Inhelder, Sinclair & Bovet, 1974〕。特に、ミクロな短期的変化とマクロな発達的变化とを対応づけていくことにより、発達的变化の過程を学習として考え直していくアプローチが興味深い。

そのようなアプローチの代表者の1人である Karmiloff-Smith〔1979〕は、言語の獲得や地図の作成、板のバランスなどの分析を通して、マクロな水準での年齢を追っての発達傾向と、短い時間の中で課題に続けて取り組んでいるときに子どもが見せる変化とが対応していることを示している。〔Karmiloff-Smith & Inhelder, 1974/1975. も参照。〕

その長期、あるいは短期の発達的变化を理論的にまとめるとこういうことだ。子どもが様々な知識の表現のための手続きを獲得していく過程を分析する。すると、初めのところでは、子どもは一見すると複雑な形式を使っているが、これは表面的な模倣にすぎない。ところが、すぐに様々な意味を子どもは分析し、各々を別の部分的な理論とし、それぞれに対応した形式を用いるようになる。この各々に充分習熟すると、子どもはいわば一歩しりぞいて、システムを全体としてとらえ直す。それまでは、部分的な理論と手続きが相互に独立し並存していたのが、メタ手続き的に分析し直し、部分間の統合をはかるのである。その結果、しばしば、一つの形式が複数の意味・機能をもつようになる。しかも、子どもがこのように統合を行なうのは、それ以前に問題がうまく解けないので困ったという経験があるからというよりも、統合のために統合するようなのである。手続きの間に一貫性を求め、手続きの並列とか例外とかで処理することを望まないようなのである。そのため、途中ではかえって誤りが増えることすらある。

子どもは、そして一般に学習者は、知識を組織化し、一般化し、一貫したものに自発的にしようとする傾向があるらしい。単に、個別的な課題が

解けるだけでは満足しない。従って、学習は、また発達は、単に個別的な手続きの獲得と集積にはとどまらない。それらの手続きの関連をつけていくメタ水準の働きがあるのだ。そして、メタ水準での統合を容易にするとという意味で、個別的な手続きの熟達・自動化は重要なのである。

このような興味深い示唆を与えてくれると同時に、ピアジェ派の最近の仕事は、ミクロな水準での変化——学習——を分析することを通して、マクロな水準での変化——発達——を見通していく方法を示してくれる点でも興味深い。学習の研究から発達過程を解明する見通しがそこから得られるかもしれない。すでに述べてきたエキスパート研究との結びつきにより新たな発展を期待できる。

## 10. おわりに

学習の研究は、一方では、LISP 表現を駆使して、知識の構造の変化を、変化が生ずる過程そのものの記述を通して解明し始めている。他方では、現実的な、生態学的に意味のある課題、知識領域を扱い、教育の問題に取り組み始めている。知識構造の変化を扱うことから、対象とする知識の範囲・まとまりも大きくなっているし、それだけの量が変化するためには時間も長くとる必要も出てくる。それは、また、発達研究との結びつきももたらしつつある。

今や、学習とは、条件づけとか単語の記憶とかを意味するだけでなく、心理学の外で普通に意味する事柄、算数、ピアノ、母国語、等の学習そのものを意味するようになったのである。それは、実用的にも歓迎すべきことだし、また、心理学の理論がそれだけ強力になったことを意味している。認知心理学的には、実用的な課題を扱うこと自体が尊いのではない。そのような課題を、科学的な厳密性を損うことなく、むしろ豊かにする形で扱えるようになったことが尊いのである。

そのことを可能にしたのが、LISP に代表される表現手段である。そのことは、すでに、この本の他の章で明らかにされているし、本章でも示し



た。しかし、それと同時に大事なことは、人間にとっての学習の意味である。人は何故に学ぶのであるか。この問いにももちろん正解などはなからう。科学的に意味のある問いでないかもしれない。にもかかわらず、この問いを問うことが学習についての研究をより豊かな方向に進めることではなからうか。そして、これまでの節から断片的にはあるが示唆されることは、学習者自身が、なぜ学ぶのかということを、意識的か無意識か、自らに問うているらしいということである。

この問いを心理学的に実質化することは容易なことではない。しかし、いくつか重要な軸は現われてきている。1つは、知識構造において宣言的知識と手続き的知識をどう区別し、どう関連づけるか。第2に、メタ認知をどう位置づけるか。それは、モニタリング、方略、意識といった事柄とどう区別され、あるいはされないのか。第3、知識獲得の段階を区別し、その段階に応じて学習の機構を変えていかなければならないのかもしれない。第4、学習において、目標、機能、意義といったレベルの概念をいかに導入してモデル化するか。

これらの問題を追究する上で、コンピュータ・シミュレーション、実験室的研究、生態学的場での分析はこれまで以上に関連づけられなければならないし、されるであろう。その中で、学習、教育、発達の問題が、人間の認識とは何であるのかという根本的な問いの展開としてとらえられていくだろう。そして、さらに、新しい問題、たとえば、人と人とのやりとりの中でいかに学習は成立していくのか、知識はいかにして間主観的なものとして存在しうるのかといった問いも問われることが期待される。

#### 引用文献

- Anderson, J. R. 1982 Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89, 369-406.
- Anderson, J. R., Greeno, J. R., Kline, P. J., & Neves, D. M. 1981 In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*. Lawrence Erlbaum Associates.

- Anderson, J. R., Kline, P. J., & Beasley, Jr., C. M. 1979 A general learning theory and its application to schema abstraction. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, Vol. 13. Academic Press.
- 安西祐一郎, 佐伯隼, 無藤隆 1981 L I S Pで学ぶ認知心理学 1 学習. 東京大学出版会.
- Anzai, Y., & Simon, H. A. 1979 The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86, 124-140.
- Bransford, J. D., Stein, B. S., Vye, N. J., Franks, J. J., Auble, P. M., Mezynski, K. J., & Perfetto, G. A. 1982 Differences in approaches to learning: A preview. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 390-398.
- Brown, A. L., Bransford, J. D., Ferrara, R., & Campione, J. C. 1983 Learning, understanding, and remembering. In J. Flavell, & E. Markman (Eds.), *Mussen handbook of child psychology*, Vol. 1. Wiley.
- Brown, J. S., & Burton, R. R. 1978 Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills. *Cognitive Science*, 2, 155-192.
- Brown, J. S., & VanLehn, K. 1980 Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills. *Cognitive Science*, 4, 379-426.
- Carpenter, T. P., Moser, J. M., & Romberg, T. A. (Eds.) 1982 *Addition and subtraction: A cognitive perspective*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Chi, M. T. H. 1978 Knowledge structures and memory development. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* Lawrence Erlbaum Associates.
- Chi, M. T. H., Glaser, R., & Rees, E. 1982 Expertise in problem solving. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence*, Vol. 1. Lawrence Erlbaum Associates.
- Franks, J. J., Vye, N. J., Auble, P. M., Mezynski, K. J., Perfetto, G. A., Bransford, J. D., Stein, B. S., & Littlefield, J. 1982 Learning from explicit versus implicit texts. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 414-422.
- Gentner, D. 1975 Evidence for the psychological reality of semantic components: The verbs of possession. In D. A. Norman, & D. E. Rumelhart (Eds.), *Explorations in cognition*. Freeman.
- Greeno, J. G. 1978 A study of problem solving. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology*, Vol. 1. Lawrence Erlbaum Associates.
- Greeno, J. G. 1980 Psychology of learning, 1960-1980: One participant's observations. *American Psychologist*, 35, 713-728.

- Karmiloff-Smith, A. 1979 Micro- and macrodevelopmental changes in language acquisition and other representational systems. *Cognitive Science*, 3, 91-118.
- Karmiloff-Smith, A., & Inhelder, B. 1974/1975 If you want to get ahead, get a theory. *Cognition*, 3, 195-212.
- Larkin, J., McDermott, J., Simon, H. A. 1980 Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208, 1335-1342.
- Mandler, J. M., & Goodman, M. S. 1982 On the psychological validity of story structure. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 21, 507-523.
- Mandler, J. M., & Johnson, N. S. 1977 Remembrance of things parsed: Story structure and recall. *Cognitive Psychology*, 9, 111-151.
- Neves, D. M. 1978 A computer program that learns algebraic procedures by examining examples and by working test problems in a textbook. *Proceedings of the 2nd conference on computational studies of intelligence*. Toronto: Canadian Society for Computational Studies of Intelligence.
- Neves, D. M., & Anderson, J. R. 1981 Knowledge compilation: Mechanisms for the automatization of cognitive skills. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Paris, S. G., Newman, R. S., & McVey, K. A. 1982 Learning the functional significance of mnemonic actions: A microgenetic study of strategy acquisition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 34, 490-509.
- Resnick, L. B. 1982 Syntax and semantics in learning to subtract. In T. P. Carpenter, J. M. Moser, & T. A. Romberg (Eds.), *Addition and subtraction: A cognitive perspective*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Stein, B. S., Bransford, J. D., Franks, J. J., Owings, R. A., Vye, N. J., & McGraw, W. 1982 Differences in the precision of self-generated elaborations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 399-405.
- Stein, B. J., Bransford, J. D., Franks, J. J., Vye, N. J., & Perfetto, G. A. 1982 Differences in judgements of learning difficulty. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 406-413.
- VanLehn, K., & Brown, J. S. 1980 Planning nets: A representation for formalizing analogies and semantic models of procedural skills. In R. E. Snow, P. Ferderico, & W. E. Montague (Eds.), *Aptitude, learning, and instruction*, Vol. 2. Lawrence Erlbaum Associates.