

## サイバネティックスと教育

長谷川 淳

### 6 サイバネティックスと神経系

ある情報を与え、それにもとづいて目的にかなった行動をさせるようコントロールすることが、制御である。ある目的をもった行動をする際に、計画され目標とする状態と、実際に到達された状態との差が、フィード・バックされ、その差が測定され、その差を少しずつ減少させるように、つぎの動作の仕方を決定していく。このような方式は、機械系だけでなく、人間の神経系にも見られる。サイバネティックスによって確立された制御の一般的法則は、人間の神経系の機能の理解にとってもきわめて重要である。そして、人間や動物の生体における調節、中枢神経系における調節は、フィード・バックを基礎にして行なわれているということは、サイバネティックスの基礎的な仮説であるが、これを検証する多くの事実がある。

たとえば、頭を切りとったカエルの足に、酸をしめした紙片をのせると、カエルは必ず他の足でそれをおとす。しかし、その足をおさえると、第3の足でそれをおとす。この実験で、最初の反応が必要な結果を達成しなかったという中枢神経系へのフィード・バック信号にもとづいて、変わったものと思われる。

また、有機体がおかれている条件の中で、恒常性（ホメオスタシス）を維持するために、フィード・バックは重要である。人間にとって、体温、血圧、血液中の糖分の含有量などが一定でなければならない。この恒常性を維持するために、標準からの偏差が中枢神経系に信号を送り、神経系はこの情報を、心臓、血管、肝臓等の器官に伝えられる運動刺激に作り直す。そしてこれが、標準値に復帰するためにフィード・バックの通信が働く。すなわち、器官の中に発生する実際の変化についての信号が、中枢神経系に伝えら

れる。

自動機械系と有機体とに共通なフィード・バックの原理は、偶然的にあらわれるものではなく、いずれの場合も、変化する諸条件のなかで、余儀なく作用する。そのために、その条件のもとで作られる反応が、与えられた諸条件との相互関係の中で現われるためには、運動器官から中枢神経系への、相当した信号が必要である。フィード・バックは、中枢神経系の機能の復元と再組織の基礎となっている。犬の足の運動を制御する神経を切断し、その末端と、内部器官の活動を調節する迷走神経とを接合する。もしフィード・バックの助けがなければ、この手術によって、足の運動機能が破かいされ、全く調子のくるったものになるであろう。最初、手術直後には、足に触れると犬は咳や嘔吐をおこし、他方、呼吸運動その他内部器官の運動とともに、足は不随意運動をおこす。しかし次第に、迷走神経は再学習し、内部器官の活動に影響をおよぼさないように、足の運動を制御しはじめる。このことは、任意の器官に、それぞれの信号が神経を通じて送られた後に、いかにしてその命令を実現し、それに相応して新しい信号を送るべきかについてのフィード・バックを受けとった結果である。フィード・バックは、人間においては、すべての器官の正常な働きを保証しながら、たえず作用している。神経系の活動に何らかの障害が起こったとき、とくにその役割は重要である。

小脳に障害をうけた人は、体の調節、ことに運動の調節がとれず、運動失調と言語障害が特徴的である。目的物をとろうとしても、手がふれて思うようにとれない。またあまりに強くつかんで、こわれやすいものをつぶしてしまう。これはすべて、小脳が運動の修正を行わないために見られる運動の惰性の結果である。運動器官から小脳に送られる信号に故障がおこると、修正のための命令がおくれ、惰性による運動が必要以上に大きく現われる。運動をいっそう大きく修正するために、さらに大きな反対の運動が必要になる。しかし、それについての信号がさらにおくれ、その結果、運動は必要以上に強くなる。結局、運動はなめらかでない断続的な振動となり、いわゆる企図震盪という状態になる。言語器官においても、同様な現象があらわれる。

同様なフィード・バックの障害は機械系にも見られ、このような障害は系の破かいをもたらし、たえず変化する外部条件への適応を不可能にする。反対に正常な機能を果たしているフィード・バックは、系を保持し、変化する外部条件への適応が保たれる。

サイバネティクスによって確立された制御の一般的な法則は、新しい仮説を立て、それを検証するという方法で研究する可能性を、生理学者や心理学者に与えている。自動調節のサイバネティクス機構をつくることによって、生体にできるだけ近接したモデルを作り、それを根拠にして脳の活動を研究することが可能になった。もちろんモデルによっては、脳の活動の特質の解明に、最終的な解答を与えることはできない。しかしモデルをつくることによって、神経系の研究の過程で、生理学と心理学の前進を促すような仮説を立てることを可能にしている。

高次神経活動の法則性は、普通、外からの観察を基礎にして導き出される。機械系においては、その系の中でおこるプロセスを直接に観察して、系の内部を見ることが可能である。人間の精神活動の病理を理解するために、機械の正常な働きの破かい現象を研究して、多くの興味ある事実が得られるように、機械と人間とのアナロジーを利用し、高次神経活動のモデルを作ることによって、人間の精神活動の研究が可能になるであろう。

適当な機械的モデルを使って得られるアナロジーにより、神経系の特質を正確に算出することができるであろう。高次神経活動の特質を類推させるような特性が、機械の中で起こり、それを正確に計算することもできるであろう。もちろんモデルは、高次神経活動の本性と独自性を、そのまま再現することはできない。しかし、高次神経活動の類型の中にあるものと、任意の自動機械系一般の中に見られる活動のなかにあるものが、共通していることを、モデルは示している。またこれによって、神経活動の類型をいっそう正確に分析できるようになるであろう。

高次神経活動の研究にとってサイバネティクスが重要であるのは、中枢神経系のモデル化や、それをモデル化した機械の利用だけではない。サイバネティクスによって確立された制御の原則は、脳の活動を、質的・量的な側面から数学的に研究することを可能にしている。その1つは、制御のために必要な、伝達される情報の量の算定である。この問題は特に教育にとって重要であるが、情報伝達のもっとも経済的なコード(符号)の作成、系の中の信号の保存(記憶)の問題、妨害に対する抵抗、系の情報の容量を増大する方法の研究の問題と関連する。

現在すでに、いくつかの研究の成果があげられ、外部の影響を知覚する感覚受容器の数は、伝達された情報を改造する細胞の数よりも、かなり多いこ

とが、明らかにされていると言う。また、神経系は一定量の情報を受けた場合にだけ都合よく働くということ、情報量が増大するとともに、反応の停滞の時間が長くなること、また情報の知覚と変更に最大速度があること、そして情報の過剰はまちがった反応をひきおこすことなどが、実験的に明らかにされていると言う。このようにして、情報には最適の量があり、この最適量の情報は、中枢神経系によってもっともよく変換されるものであろう。

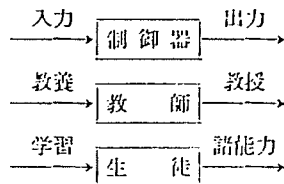
### 7 教育におけるサイバネティックス

サイバネティックスは、科学や工学の諸分野に広範に應用され、自動機械、電子計算機等のはたらきの基本となっている。この新しい科学はまた、心理学や生理学、さらにまた社会科学の諸分野にも應用され、自然現象だけでなく、社会現象や心理現象についても、その合法則性の客観的・数量的な把握のために利用されてきている。学習、人格の形成等、教育学が扱う人間の心理的プロセスの研究にも、この新たな科学の方法をとり入れることが必要になっている。

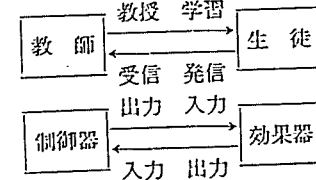
教育のプロセスの中で、機械系におけるプロセスと同型であり相似なものは、教師=生徒系における教授=学習である。教授=学習は、教師の指導のもとで、生徒が知識・能力・習熟を身につけていく過程であり、この過程には、教師の活動=教授と、生徒の活動=学習とが含まれている。この教授=学習の過程を単純化して、教師が生徒に知識を伝え、生徒がそれを受けとりそれについての了解や質疑の応答をすることに限定するならば、この教師=生徒系は、サイバネティックス的な機械系と相似である。

教師は、教科についての専門的な知識と教職教養をうけとり、それを記憶し、身につけ、教科についての知識を生徒に伝える。これは、動力の供給を受け、仕事をする機械と相似であり、入力を受け出力を出す制御器と同型であり、1つの「開いた系」である。生徒はまた、入力を受けて学習し、出力として諸能力を発揮し、社会的な実際活動を行なう1つの系である。

この教師と生徒とを、教授=学習という過程で結びつけ、情報の交換を行なえば、また1つの「閉じた系」が成立する。教師は生徒に、教師の出力として情報を送って



知識を伝え（教授）、生徒は、その情報を入力として受けとり（学習）、生徒がすべてを理解すれば、了解の応答を出力として教師に送り、教師はそれを入力として受けとり、サイクルが完了する。もし生徒に不明の点があれば、それについての質問を出力として発し、教師はそれを入力として受けとり、さらにこのサイクルをくり返す。これは制御器=効果器系と同型であり、一種のフィード・バック機構をなしている。機械が入力を出力に変換するしくみは、その機械の機構のいかんによる。また教師が自分の知識を、教授内容と方法に変換し生徒が学習結果を、自分の発達と実際的な諸能力に変換するしくみは、神経系の機序（メカニズム）による。人間の神経系は、きわめて精巧なサイバネティックス的な系である。



これは、教師=生徒系における知識の教授=学習に限らない。ある能力や習熟を身につけさせる場合も同様である。能力や習熟は、知識の集積と深化を基礎にして得られるものであり、知識間の連合、その実践への適用によって強化される。それだけでなく、教授過程のサイバネティックス的研究によって、知識の構造だけでなく、諸能力の構造が明らかにされ、その操作のシステムが明らかにされつつあり、その論理構造を数式化する試みが行なわれている。

このように、教授=学習の過程を単純化し、教師=生徒系のなかに、機械系との相似や同型を見出し、機械系における情報伝達と制御の法則を適用し、機械と人間に共通した一般的法則性を研究することによって、教授=学習のメカニズムの、これまでよく知られていなかった部分を開発する可能性が開かれつつある。

### 8 学習の構造

人間の日々の経験は、記録され、保存され、必要に応じて再生される。これが人間の記憶である。学習は、これを反復し、強化することである。記憶は、大脳に形成される神経結合の強化によって成立する。学習の基礎になる記憶は、環状結合をなす複雑な神経細胞の連鎖でつくられる閉回路のなかに刺激による興奮のインパルスが循環することによって脳に刻印され、新たな

痕跡を残すことだと考えられ、また一定の型の閉回路を、インパルスがいつでも回り得るようになってきている状態だとも考えられている。

神経細胞には、それからでている多くの樹状突起があり、そのうちの1本は普通長くのび、これを軸索といい、神経線維の芯となっている。この全体がニューロンで、ニューロンは、突起によって他のニューロンとランダムに結合して、神経細胞の連鎖をつくっている。この結合する箇所がシナプスである。興奮のインパルスが回り、あるいは回り得る状態になっているためには、この環状結合をなしている神経細胞の連鎖のシナプスが、インパルスを伝達しやすいようになっていること、すなわち伝達の抵抗が小さくなっていることが必要である。そのため構造についてさまざまな説がある。興奮のインパルスがシナプスを通ることをくり返すことによって、シナプスに構造的な変化が起こり、他のニューロンと接する神経線維の末端の終末ボタンが大きくなったり、あるいはその数が増えたりして、シナプスの抵抗が減少して、インパルスが通りやすくなっていると言われている。あるいは、ある伝達物質（アセチルコリン、あるいは他の、非コリン性物質など）がいわゆる多く分泌されて、伝達抵抗が減少するとも言われている。

さらにまた、インパルスを受けると、神経細胞の細胞質を形成している蛋白質の構造に変化が起こり、すなわち、神経細胞に刺激が繰り返されるうちに、細胞の核酸に変化が起こり、その結果新しい蛋白質が合成されると考えられる。核酸と記憶との関係を調べた実験がいくつか行なわれている。その1つは、ある刺激に対して条件づけられ学習したブラナリア（渦虫）を、未学習のブラナリアに餌として与えると、その条件反射を獲得（学習）するというものである。またある実験では、学習したネズミの脳から核酸を抽出して、これを他の未学習のネズミに注射すると、そのネズミは前のネズミが学習した能力を備えるようになるということである。しかしこれには、一方でこれを否定するような実験結果も報告されている。これには、今後さらに進んだ生理学的・生化学的な実験と証明が必要である。

いずれにしても、このようにして脳に記憶の痕跡が残されることにより、脳に脳の働く規則がつくられ、これが学習を形成し、人間の行動の型がつくられる。この脳の働く規則は生まれつきのものではなく、主として学習によって作りあげられるものである。人間の特質は、学習する方法を学習する能力を習得することであり、脳が一般的規則を獲得してこれを応用する能力を

習得することにある。このような脳の働きに関する研究はすでに進められつつあり、この研究を進展させ、教育の定石を破るような新しい教育方法を発見して、脳の働く規則をいっそう効果的に教え込むことが不可能であるという根拠は何もない。

この脳の働く規則がどんな形式のものであるかは、現在まだ知られていないが、やがて明らかにされるであろう。それが明らかにされれば、まだ脳細胞に刺激の痕跡が固まらないうちに、その規則と、規則に適応した知識とを、効果的に教えることができるであろう。その規則とそれに適応した知識とは、おそらく、きわめて基礎的・要素的な知識であろうし、教科の構造的な骨格であろう。これらの複合によって脳の規則がつくられ、統一的なパターンが形成され、のちに受け入れる新たな情報をそれと比較し、検証する基本的な法則となるであろう。この問題は、今後の大脳生理学・心理学・サイバネティクスなどの研究と実験にまたなければならない。

## 9 教授＝学習と制御

教授＝学習の主要な任務の1つは、情報の伝達・受容である。情報の伝達は一般に、何かを知らせることであり、決定することである。等しく起こり得、また互いに区別できる有限個のうちの1つを決定することである。教授＝学習によって、生徒の知識の不確定度を減少させて明確にし、無秩序を秩序にかえていく。すなわち教授＝学習は、サイバネティクスにおけるエントロピーを減少させる方向に導いていく。生徒は知識を獲得し、不確かなことを確定することによって、不確定の程度、すなわちエントロピーを小さくする。この教授＝学習におけるエントロピーの減少は、物理学におけるエントロピーと、形式において相似の関係にある。

知識の教授は、経済的・効果的におこなわれなければならない。教授される情報は、一般に、あれかこれか、然りか否かの二者択一に分解できる。したがって情報は、何回の質問で決定されるかによって、不確定度（選択の自由度）を数量的に表現することができ、この不確定度の尺度がエントロピーであり、これを減少させるのが、教授＝学習である。しかし他方、情報には、雑音、通信のみだれが入り、誤解を生じることがある。教授＝学習においても、雑音その他さまざまな妨害が入り、教育をさまたげる。情報におけるこの誤解をさけるために、簡潔さと反対の、冗長度を加えることが必要にな

る。電話で電報を送信する場合がその例で、たとえば「あ」という信号を送る場合、「あさひのあ」と送り、「た」の場合、「たばこのた」と送る。通信の量が5倍すなわち冗長度が80%になるが、「あめ」と「はれ」を間違ふことはない。教授の場合にも、反復することにより、間をおくことにより、あるいはその他の方法により、間違いなく知識を定着させることが必要である。このようにして、情報を、経済的・効果的に、しかも正確に送るためにその量を数学的に計算することが、サイバネティックスの重要問題の1つである。教授=学習の場合にも、その効果を高めるために、生徒に伝達する情報の量や冗長度を数学的に計算することが重要である。

教授=学習の主要な任務の第2は、制御である。制御は、ある情報を与えて、それにもとづいて目的にかなった行動をさせることである。教授=学習において、教師は教育目標を設定し、教育計画を立て、生徒に知識や技術を情報として与え、生徒を制御して望ましい方向に発達させる。これは、旅行の目的地を定め、地図によって計画を立て、自動車を運転・制御して、その目的地に向かうことと相似である。このドライブの途中で、絶えず障害物に出会う。そこに障害物があるという情報が、運転者の感覚器官を通してフィード・バックされ、ハンドルを回すという次の動作が行なわれ、自動車が制御されて先へ進む。このフィード・バックは、ある目的をもった動作をする際に、計画された状態と、実際に到達された状態との差を、感覚器官を通して知り、それを修正しながら、それ以後の動作の仕方を決定していく方式である。この方式は、機械系だけでなく、人間の運動神経系にも見られるし、また教師=生徒系においても見られる。教師=生徒系における教授=学習において、目標と達成された成果との差にもとづき、あるいは生徒からの質疑や反意によって、教師はそれ以後の教授を制御して行く。

教師が教育目標を設定し、教授し、学習させ、目的にかなった教育をするためには、あらかじめ周到な教育計画を立てなければならない、この教育計画の作成は、自動制御系や電子計算機におけるプログラミングに相当する。

教授の過程において、生徒に知識を与え、その行動を制御し、目標に向かって生徒を発達させるためには、第1に、何を教えるべきかの、「教授内容のプログラミング」が必要である。この教授内容のプログラミングは、基本的な内容を教科の構造に従って忠実に編成することが必要であらう。このことは、大脳生理学の研究における推測とよく一致しているし、またブルーナー

が『教育の過程』の中で述べていることとも一致している。ブルーナーは「基本的なものを理解するならば教科を理解しやすくなる。……学習した概念が基本的、または基礎的であればあるほど、新しい問題に対する適用性の範囲がひろがってゆくであろうことはほぼ確実である」、したがって「教材の根底にある構造に忠実に教育過程を編成する」ことが必要であることを強調している。また、ある情報による刺激の興奮のインパルスが、神経細胞の環状結合を回ることによって、脳細胞に記憶が刻印される際に、その情報は、きわめて要素的・基本的なものでなければならないことは、神経細胞と、自動制御系における電子管などの働きとのアナロジーから類推される。一度刻印された記憶の痕跡は、忘却し消滅しない限り、別の記憶の刻印を受け入れ難いであろう。したがって脳細胞には、教科の構造、知識や法則の骨組みとなり要素となる記憶を強引に刻印し、定着させておくことが必要であり、それを実現するようなプログラミングが必要である。

第2に、生徒が一定の課題を解決し、一定の活動を遂行するようにするために、生徒に習得させるべき問題解決の「操作のシステムのプログラミング」が必要である。問題解決能力とは何か。創造性とは何か。判断力とは何か。これらはどんな要素から成り立ち、どんな構造をもっているか。これらの能力の獲得の過程で、生徒の頭脳の中で何が起きているか。これらの問題はこれまで十分解明されていなかった。これらの諸能力、そのプロセスは、どんな構造をもち、どんな構成分子から成り、どのように相互に結合されているか。何をどのような順序と方法で生徒に教えなければならないか。これらの問題は、大脳生理学・実験心理学・サイバネティックスの研究、その他工学の分野で応用されるモデル化の方法によって、実験的に解決されなければならない問題である。

## 10 アルゴリズム

問題解決のさまざまなプロセスの中で、「知的活動のアルゴリズム」のモデルを作ることが重要である。「アルゴリズム」とは、明確な法則にしたがって行なわれる操作のシステムであり、数学の問題の解法や証明、文法の規則などには一定のアルゴリズムがある。元来この語は、算法という意味で、一定の式、論理記号で表現することができる。

数学の問題の解法に幾通りかあるように、知的活動のアルゴリズムや問題

解決の操作のアルゴリズムも1つではない。アルゴリズムを構成する場合に、第1に、その問題がどんな問題であるかを判別する「判別アルゴリズム」を構成することが必要である。与えられた二次方程式の根が、実根か虚根かを調べるのに判別式の正負を調べるのと同様である。第2に、アルゴリズムを用いて解決する問題の論理的構造を明らかにして、「解決アルゴリズム」を構成することが必要である。

このアルゴリズムは1つではなく、複数あり、これを用いて問題を判別し解決する際に、生徒の心理的プロセスの形成に適合し、一致するように構成されなければならない。また、操作の量の観点からも最適のものでなければならない。すなわち、能率的・効果的に教授するという観点から、教材の分析に情報理論を適用して、情報量(エントロピー)を計算し、最大の情報量の情報が与えられるようなアルゴリズムを作らなければならない。また、操作の量を計算して、最少の操作量によって問題を解決し、1操作当たり最大の情報量が得られるようなアルゴリズムを作らなければならない。

しかしまた、知識や能力を生徒に定着させるという観点から、反対に繰り返すにより、冗長度を増して情報量を減らし、迂回させることによって操作量を大きくするようなアルゴリズムが必要である。この2つの、互いに矛盾する要求を満たし、最適なアルゴリズムを見出すためには、教育心理学による実験的検証が必要であろう。それとともに、生徒にアルゴリズムそのものを教えて、論理的思考方法を生徒に形成させるために、複数のアルゴリズムを比較して、最適のアルゴリズムを選ぶことが必要である。

教材の論理的構造を明らかにし、アルゴリズムを構成する場合に、情報や操作を特徴づける数量的なパラメーターが必要である。教材の構造を明らかにして、生徒の知識習得の過程や心理的プロセスを、記号論理学における論理記号を用いて記述し、生徒の知的活動の最も合理的な方法を、数学的に計算することが必要である。

すでに述べたように、教授の過程において生徒に知識を与え、問題解決の能力を付与するためには、教授内容や操作のシステムのプログラミングが必要である。この教授内容や操作のシステムには、一定の構造があり、アルゴリズムがある。したがってプログラミングは、このアルゴリズムにもとづいて作成され、一定の論理記号で記述することが必要である。教授の過程において生徒に知識を与えるということは、混沌の状態を整理して、無秩序を明

確な秩序にかえていくことであり、エントロピーの大きな状態から、それが減少する方向に導いていくことである。したがって、多くの可能な場合や事象の中から、一般に、あれかこれか、然りか否かの二者択一的方法で、1つを決定していくことである。

多くの可能な場合の中から1つを選ぶという単純な例をあげよう。

いまここに80個の貨幣があり、そのうち1個は、にせがねで、他のものよりも軽いとする。これを天びんで目方をはかることによって、そのにせがねを見つけるには、どうしたらよいか。何回の操作で発見できるか。

(1) まず左右の皿に1個ずつのせる。つりあった場合、一方の皿の貨幣をおろし、別な1個をのせる。この操作をくり返して一方の皿の貨幣をつぎつぎに交換していく。この場合、幸運にも第1回目のにせがねが見つかるかも知れないが、最悪の場合、最後の79回目に見つかるかも知れない。したがって平均して40回の操作が必要である。この場合、情報量は  $\log 80$  であるから、1操作当たりの情報量は、 $\frac{\log 80}{40}$  である。

(2) もう少し簡単な方法は、両方の皿の貨幣を同時に、つぎの2個と交換していく方法である。この場合、最大限40回の操作、平均して20回の操作でにせがねを発見することができる。

(3) さらに簡単な方法は、80個を2組に分け、それぞれ左右の皿にのせ、軽い方すなわち、にせがねが含まれている方の40個をとる。これを、さらに20個ずつの2組において天びんにのせ、軽い方をとり、これを繰り返していく。4回目に得られた軽い方の5個を2組にわけるために1個加えて3個2組とし、軽い方の3個をとる、さらに1個加えて2個2組とし、軽い方の2個から軽い1個をとる、これがにせがねで、7回の操作で発見することができる。

(4) このような選択をする場合、一般に、等確率の2組においてその1つをとっていくのが普通であるが、(この場合は2等分してその1つをとる)、これ以外に方法はないだろうか。もっと簡単な方法がある。それは、等しい3組に分け、その2組を比較する方法である。80個は3等分できないから、27, 27, 26, の3組に分ける。そして等しい2組をとる、それぞれ両皿にのせる。どちらかが軽ければ、軽い方ににせがねが含まれている。両方がつりあえば残りの1組に含まれている。それをさらに3組に等分し、同じ操作をくり返していけば4回の操作で発見できる。この場合の1操作当たりの情報

量は  $\frac{\log 80}{4}$  である。

これ以上分ける組の数を大きくすると、(3)の場合、(2)、(1)の場合に逆もどりしてしまう。いま述べたように、このような選択の場合、等確率の2組に分けるのが普通であるが、この3組に分けて1つを選ぶ方法には、偶然も運不運もまったく含まれず、きわめて明快で、直さぬ方法である。

この問題の解決には、以上述べたような4通りの解決法、アルゴリズムが考えられ、それぞれ40回、20回、7回、4回の操作で解決される。この場合は、80個のうちから1つを選ぶという情報量の大きい選択を、できるだけ少ない操作量で解決するようなアルゴリズムをつくって、生徒に問題解決の方法を教えることが必要であり、また論理的な思考方法を教えるためには、この4つの解法のアルゴリズムそのものを教え、比較検討させることが必要であろう。

つぎに、この問題を解決し、3組に分けて4回でにせがねを見つける場合のアルゴリズムの論理式をつくってみよう。

天びんの両方の皿に27個の貨幣をのせる操作をAで示す。天びんがつりあえば、論理条件が満たされたものとして、 $p=1$ とし、上向きの矢印であらわす。このばあい、にせがねは残りの26個中にあり、その中から選び出す操作を、M(26)とする。もし、つりあわず、一方の皿が軽ければ、論理条件が満たされないものとして、 $p=0$ とし、下向きの矢印であらわす。この場合、にせがねは、軽い方の皿にのっている27個の中にあり、これを $L_{27}$ とする。これにつづいて、さらに3組に分けて行なう操作を、B、C、……とする。 $\phi$ は、発見されたことを示す。この問題解決のアルゴリズムの論理式の例を示すと、つぎのようになる。

$$A p \uparrow^1 M(26) B p \downarrow^2 M(8) C p \uparrow^3 M(2) D p \downarrow^4 L_1 \phi \downarrow^1 L_{27} B p \uparrow^5 M(9) C p \downarrow^6 M(3) D p \downarrow^7 M(1) \phi$$

ここで矢印上の数字は操作の順序を示し、4のつぎの1は、最初のAという操作で、論理条件が満たされない場合(↓)のことを示している。

アルゴリズムの論理式のもうひとつの例を示そう。1から8までの数のうちから1つを考えさせ、それを、YESとNOだけで答えさせて、考えている数をあてる問題を考える。まずはじめに等確率な2組に分け、その数が4より大きい( $x > 4$ )か否かを問う。さらにそれを2つに分けて問い、これ

をくり返し答えが発見された場合をAで示す(答えが8であれば $A_8$ )。このときの論理式は、つぎのとおりである。

$$p(x > 4) \uparrow^1 p(x > 6) \uparrow^2 (x > 7) \uparrow^3 A_8 \downarrow^3 A_7 \downarrow^2 p(x > 5) \uparrow^4 A_6 \downarrow^4 A_5 \downarrow^1 \\ p(x > 2) \uparrow^5 p(x > 3) \uparrow^6 A_4 \downarrow^6 A_3 \downarrow^5 p(x > 1) \uparrow^7 A_2 \downarrow^7 A_1$$

この式は、あてる数が、4より大きく( $\uparrow^1$ )、6よりも大きく( $\uparrow^2$ )、7よりも大きければ( $\uparrow^3$ )、8であり、7よりも大きくなければ( $\downarrow^3$ )7である。そして6より大きくなければ( $\downarrow^4$ )、5より大きいかなかを問うていくということを、矢印につけた数字でその順序を示している。

このように、問題のアルゴリズムの論理式がつくられれば、プログラミングの作成が容易にでき、これが、ティーチング・マシン用のプログラム作成の基礎になる。

## 11 非アルゴリズムとプログラム学習

教材の論理的構造を明らかにし、また問題解決のプロセスを明確にするために、そのアルゴリズムを作ることが必要であるが、問題解決のアルゴリズムがまだ解明されていないか、あるいはそれが存在しないか、あるいは知られていないような問題を、生徒が解かなければならないことがある。さらにまた、ある問題のためのアルゴリズムをつくることはできても、そのアルゴリズムによってその問題を解くことができないような問題がある。

多くの創造的なプロセスは、このような非アルゴリズム的なプロセスであり、このプロセスが、また教授の過程で大きな役割をもっている。生徒による問題解決がアルゴリズムによって導かれない場合、その特徴的な様相は、最も確からしい過程、すなわち確率の大きい過程をとるものと考えられる。アルゴリズムに従う行動には、人間の選択の可能性が残っていない。もし人間が問題解決のアルゴリズムを知らない場合は、いつでも選択の可能性をもっている。この選択は、何によって決定されるか。これはおそらく、問題状況の確率的評価および生徒が自由に選ぶことができる解決方法の確率的評価によって決められるであろう。創造的なプロセスの多くは、その基礎に確率的なメカニズムをもっていると考えられる。したがって、ほとんど起こりそうもないプロセスの経過をとる場合に、問題の解決を困難にしていることが多い。

また、時には、生徒が解決しなければならない課題に対して、生徒のあらゆる可能な解決を予見することはできない。予知できない事態に際して全く予知できない解答を与えるような生徒を見い出すことがある。さらにまた、全く同一の教授作用に対して、各生徒に相異なった結果を生じることがよくある。教授の一般的な方法が、すべての生徒に対して有効であり、常に期待される結果に導くとは限らない。その方法が有効でないことが明らかな生徒に対しては、何か別の新しい方法の採用が必要であり、この場合何か創造的な手順が必要である。このことは、教授作用において、何らかの未知の作用との相互作用が行なわれ、あるいは、先見しあらかじめ考慮できない何らかの偶然的な要因が影響を与えているものと思われる。これらの作用や要因をすべて前もってアルゴリズムの中に予見することはできない。

このような場合に働く法則はまた、確率的な法則で、生徒の心理の中に生じた変化の連鎖は、いわゆるマルコフの連鎖をなし、マルコフ過程として記述することができる。マルコフ過程とは、ある現象について、ある時刻以後の時刻における状態の確率が、そのはじめの時刻における状態だけで定まり、それ以前の状態に無関係な場合、この現象は履歴をもたないといい、このような現象をあらわす確率過程をいう。したがってこのような場合に、アルゴリズム的なプロセスに対して、ストカスティックなプロセス(確率過程)として、記述することができる。

アルゴリズムを構成することは、すなわち、生徒が知識や技術を習得していくプロセスの進行を制御するプログラムをつくることであり、これが厳密につくられたアルゴリズムであることもあり、マルコフ過程として記述されたものであることもある。プログラム学習は、このようなプログラムに従って、生徒の自主的な学習作業により、普通、教師が直接に教授に参加することなしに行なわれる学習である。これは、プログラム・ブックにより、あるいはティーチング・マシンなどによって行なわれる。

プログラム学習のためのプログラムには、一定のアルゴリズムがなければならないが、アルゴリズムに従って行なわれる教育は、すべてプログラム学習であるのではない。これは、プログラム・ブックやティーチング・マシンを使わずに、人間=教師によってもできるからである。また広義のティーチング・マシンによって行なわれる教育は、すべてプログラム学習ではない。たとえば、プロジェクターやテープ・レコーダー等の教育用機器によって、

教師の直接の参加なしにも、生徒に知識を伝えることができる。

プログラム学習の重要な特徴は、このプログラムのアルゴリズムが、第1に、教師および生徒の双方にとって、フィード・バックが十分に行なわれるように構成されなければならないことであり、また第2に、教授のプロセスが比較的小さなステップに分解されなければならないことである。ティーチング・マシンによる教育がプログラム学習になるためには、この教授と学習が導かれるアルゴリズムが、以上の2つの特徴を備えていることが必要である。

生徒に心理的なプロセスを形成する場合に、自然成長的な要素が大きく、生徒に伝える知識が生徒の意識の中で、どのように変形され、生徒に形成する能力が、どのように間違っ形成されるかを、教師が想像もできないことが多い。これは複雑なプロセスを構成する構成要素およびそれによる構成のメカニズムがよく知られていないためと思われる。そのために、複雑な心理的プロセス、思考のプロセスの、要素ごとの、操作ごとの形成、すなわちスモール・ステップによる教授が、生徒の心理的活動の完全な制御の重要な条件となる。

しかし、心理的プロセスの、スモール・ステップによる操作ごとの形成を成功させるには、これらのプロセスの流れに従って、生徒の意識の中でアルゴリズムがどのように構成されるかに従って、操作ごとの制御の方法をつくり出さなければならない。

教授の過程の中で起こる生徒の思考のプロセスの正常な流れからの偏差を、教師が適時に指摘し修正するためには、教師は、生徒が知識を習得し、問題を解決するとき、生徒の意識の中におこることについて、不断の情報を入手しなければならない。このような情報なしには、生徒の意識の中におこっているプロセスを完全に制御することができない。すなわち、教授の過程において、心理的活動の完全な制御ができるようにするためには、教授=学習は、フィード・バックのメカニズムをもったプロセスでなければならない。

## 12 教育工学とサイバネティックスの展望

この10数年の間に、オーバーヘッド・プロジェクター、閉回路テレビ、ティーチング・マシン、コンピューター教育システムなどの新たな教育用の機器が開発され、教育の能率を高めることをめざして学校教育に導入されてき



ている。そしてこれらの新しい技術的な装置や機械の利用法とその効果を研究する部門が、「教育工学」という名で呼ばれるようになった。

しかし、これらの技術的手段の利用と効果について研究するのであれば、それは「工学」ではない。工学の特徴は、目標を設定して、それを実現するために、設計をする学問である。したがって「教育工学」が「工学」であるためには、教育目的を実現するための、教授媒体を設計し、実現のプログラムを設計し、教育システムを設計するものであり、そのために教授過程そのものを、工学的な方法、数学的な方法を用いて研究するものでなければならない。教授の過程を、教師と生徒との間の、情報の伝達と受容の過程と考えれば、サイバネティック的な機械系における情報と制御の法則が、教授の過程にも適用できるであろう。したがって、教育工学には、つぎのような部門が含まれるであろう。

- (1) 生徒に与えるべき情報の発生、それをどのように変換し、処理するかを研究する部門。
- (2) その情報によってどのように最適に制御するか、制御の原理を研究する部門。
- (3) そのためのプログラミングを研究する部門。すなわち、知識の教育の場合には、情報の量を計算し、問題解決の場合には、操作の量を計算し、最適なアルゴリズムを算定してプログラムを作る研究の部門。
- (4) 教師と生徒との間を媒介する教育用機器の設計の基本法則を研究する部門。この教育用機器の設計には、情報の変換のしくみ、制御のプログラミング、生徒からフィード・バックされた情報を比較し照合する基準が含まれなければならない。
- (5) 教育システムの設計とその最適化を研究する部門。
- (6) 教育効果の測定の方法を研究する部門。
- (7) 人間の脳や神経細胞の構造や機能を明らかにし、記憶や学習のしくみを解明するために、大脳生理学、生化学、バイオニクスを研究し、教育への応用を研究する部門。

以上のうち、(4)の教育機器の設計と、それに関連して、(5)、(6)の研究が進められ、すでにさまざまなティーチング・マシンが製作され、学校に導入されている。しかしこれらの機械は、教授の効果を高めるために、教師と生徒の間に導入される媒介物、教材提示装置に過ぎず、現在まだ試験的な段階に

あると言ってよい。

ティーチング・マシンその他教育用機器の開発においてアメリカよりもおこなっているソビエトは、1962年末に、プログラム学習とティーチング・マシンの利用に関する学術会議をキエフ市で開催した。この前後から、教育工学の基礎理論とも言うべき、教授過程のサイバネティック的研究、すなわち上に述べた(1)(2)(3)(7)の研究が、教育科学アカデミヤを中心に進められてきている。しかし、最近のソビエトの教育学や心理学の雑誌にあらわれた論文の筆者たちが共通して述べていることは、教授の過程は制御の過程に帰してしまふことはできないし、教授過程へのサイバネティックの適用から得られる帰結は、ある限界をもっているということである。そして、ティーチング・マシンは教師にかわることはできないし、教育工学は、教育学や心理学にとって代わることはできないであろう。

ティーチング・マシン=教授用機械は、自分で教えることはできない。これら機械は、教授の効果を高めることを目的として、教師と生徒の間の情報の供給路に導入される物質的な媒介物にすぎず、教授の技術的手段の1つにすぎない。そして、論理的・心理的に検討された順次性にしたがって、情報を提供し、ある問題に対するいくつかの解答の中から選ばれて解答の正しさを点検することができるだけである。

しかしティーチング・マシンには、つぎのような長所がある。(1)論理的・心理的に検討された順次性にしたがって選ばれた知識を、生徒に綿密に供給すること。(2)つぎの情報を提供するまでに、先行する情報の習得を制御すること。(3)習得された情報をすみやかに定着させ、その効果が有効でないことが明らかになった場合に、補足的情報を提供することができること。(4)情報の種類や性質、情報提供のテンポを、生徒による習得の特殊性に調和させることができること。(5)生徒の反応を向上させることができること。(6)情報提供の視覚的チャンネルを最大限に利用できること。(7)生徒の自主的学習や反復練習に利用することができること、などである。

しかし、本来の教授=学習においては、教えるものの行動が、教えられるものの返信行動を誘い出し、ついでその行動を修正するというような、相互的なプロセスがなければならない。このことは、普通の教材提示装置と、特別な種類のティーチング・マシンとを区別する重要な指標である。ティーチング・マシンは、教師・生徒間において、不断の相互的なプロセスが実現さ

れ、教えるものの行動が、一定の目的をもって、一定のプログラムに従って、教えられるものの行動を調整するようなものでなければならない。したがって、教師の最も重要な機能、生徒へのフィード・バックの機能、生徒に対する反応、生徒の行動とプロセスを制御する機能を遂行する装置だけが、他の一般の教材提示装置と異なって、ティーチング・マシンと呼ぶことができる。ティーチング・マシンの完全さの程度は、その機械がどれだけ完全に、良好に、この機能を遂行できるかにかかっている。

教育工学的装置による授業は、生徒の能動性を著しく高めることができ、自主的学習の比重を大きくし、教授を個別化する可能性をもたらし、知識・能力の習得の質を高め、その習得の時間を節約する。またプログラム学習は、普通の授業と比較してその効果は大きい。しかし現在行なわれているプログラム学習やティーチング・マシンによる授業には、多くの問題があり、心理学的研究と教育学的検討がさらに必要であろう。

生徒の思考活動の構造的な分析と教授のアルゴリズム化の問題に関して行なわれている心理学的研究、教育学的研究は、本質において教授過程のサイバネティック的研究である。教授の過程において生徒が習得する知識・能力の構造と、それらの客観的評価の数量的基準を明らかにすることが必要である。ティーチング・マシンは、教師・生徒間の情報を特徴づける数量的パラメーターを明らかにすることによって、その作成と利用の可能性は、ますます大きくなるであろう。現在、生徒の思考のメカニズムの研究、生徒の思考の数量的基準の作成、問題解決の構造の定式化の研究の試みがすでに行なわれている。また技術的な観点から、ティーチング・マシンにおいて、エレクトロニクスの然りと否とによる制御の方法だけでなく、機械的、電気的、流体力学的に、あるいはこれらを結合して実現される論理的システムを創り出すことも研究されている。これらの研究と、ティーチング・マシンの開発と利用によって、教師を、創造的な科学・技術者の活動に接近させることが必要であろう。

しかし、教授の過程は、機械的な制御の過程に帰してしまふことはできない。また教育工学的な教授装置の応用は、教育のプロセスから教師を排除することにはならない。教師は、生徒の個性の発達、能力の発達のために重要な役割をもち、教授の指導的な機能をもっている。しかし、人間の精神的な活動の中には、まったく形式的な、選択、分類など、操作に帰着される問題

が多く、機械が労働も軽減すると同様に、人間の知的活動を容易にする能力をもった機械をつくることは可能である。ティーチング・マシンもその1つであり、ティーチング・マシンの導入によって教師の能力と役割を著しく増大させることができ、それによって教師は、生徒の心理と教育の心理学を深く解明し、生徒の知識・能力の習得における困難の原因を分析し、教授の技術をみがくことができる。

機械は、人間の思考の機能のうち、少数の基本的な論理演算の組み合わせからなる有限個の論理公式を、有限回使用して書きあらわせる機能だけしかできない。現代の科学技術によって人間の脳と同じ機能をもつ機械をつくることのできたとしても、それはものすごく巨大なものになるであろう。サイバネティックスも、教育工学も、ティーチング・マシンも、電子計算機も、人間の思考の産物である。電子計算機も、ティーチング・マシンも、人間の手で編成されたプログラムによって働く。したがって、教育において、教育工学やティーチング・マシンを過大に評価する必要はない。しかし、教育学の理論と方法の研究に、数学、記号論理学、サイバネティックス、ゲームの理論、その他の精密科学の思想と方法を導入し、教授に、教育工学、システム工学等を応用し、ティーチング・マシン等の技術的手段を導入することは、教育の研究を新たな方法で導くことを可能にし、教授の効果を高めるための条件をつくり出す可能性をもたらすであろう。〔完〕

(名古屋大学教授)

#### 参考文献

- ノーバート・ウィーナー著 池原止戈夫他訳『サイバネティックス』(第2版) 岩波書店、1962年。  
ランダ、ヤグロム著 長谷川淳他訳『サイバネティックスと教育学』明治図書、1963年。  
シャノン著、長谷川淳、井上光洋共訳『コミュニケーションの数学的理論』明治図書、1969年。