

サイバネティクスと教育学

長谷川 淳

No. 19

1965 2月

7 戻りの通信

情報の伝達・保存・再生は、人間においても機械においても、すべての制御過程にとって重要である。しかし制御は、系の制御部分から制御される部分へ効果器への、単なる情報の伝達に帰するものではなく、このプロセスはさらに複雑である。

効果器には、制御する系だけが影響するものではない。それは周囲の環境から絶えず影響をうけ、制御センターから受ける指令の実行が、しばしば妨害される。例えば、船は、突然におこる風の影響をうけて、直線航路からそれることがある。この場合にどうすればよいか。船はおそらく、風的作用にさらうことができるように向きをかえることが必要であろう。偶然の外部からの影響に対する抵抗があらゆる調節の一般的法則である。

抵抗作用は、いろいろな仕方で行うことができる。船の航路を維持するもつとも簡単な方法は、風の方向と力を一定にするために相応し

た仕方では舵をさだめることである。しかしこの場合、自動的に方向を定めることは困難である。このような方法による場合、風の方向と風力についての継続的な情報と、その舵への伝達が必要である。しかしこれは、ただ風の影響下におけるずれを予防するだけであり、船の直線的な航行を保証することはできない。それは、船は、風のほかに他の影響、例えば水の流れの影響を受けるからである。

この影響を避けるために、流れの速さを計算し、相当した修正を舵に与えなければならぬ。しかしこれでは不十分である。たとえ二隻の船が平行して航行する場合に、突然に衝突して双方とも難破することがある。船が互に接近して航行するとき、その間の流れは内部の圧力を感じ、外からの圧力作用によって船が接近する。同じ理由から、走っている列車の傍に立つことも危険である。すなわち、速く走っている列車の傍の空気の圧力は、普通よりかなり低く、外側の空気によって人間はレールの方向に押される。

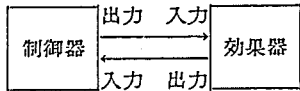
このような種類の影響をすべて先見することは極めて困難である。これらの影響を防ぐもつとも信頼できる方法は、独立な条件か

らの実際の行為のすべてのずれが、このずれを解消する方向に働く一定の返信の反応を呼びおこすようにすることである。この場合に、その原因を研究し、風の力、流れの方向などを算定する必要はない。一定の方向を維持することは、自動的に行なわれる。

このような制御方法は、すでに考えられ、船においてはこの目的のために自動回転舵が使われている。この主要な部分は、ジャイロ・コンパスで、これに従って船のコースが与えられる。船が必要な方向からそれると、ジャイロ・コンパスは実行装置へ効果器に作用を及ぼし、この装置は、相応した方式で舵の向きをかえる。船がさらに大きくずれるとこれについての情報がただちにジャイロ・コンパスに入り、それが舵の回転を大きくする。

この装置において、情報は二つの方向に動く。制御する系はジャイロ・コンパスから効果器へ舵に、また作用の結果は逆に、舵からコンパスに伝えられる。すなわち、制御装置の出力は、逆に、制御され装置の入力に効果を与える、制御する装置と効果器官との間の、このような連絡を、戻りの通信(フィード・バック)という。戻りの通信の例として、全く同じ現象を、ワットの调速機に見る。蒸気の圧力が弁に作用し、弁の開閉の量が蒸気の圧力に影響する。

自身の作用に対して外部の影響を減少させるような、この型の戻りの通信は、負の戻りの通信(ネガティブ・フィード・バック)とよばれる。負の戻りの通信を基礎とする調節の原理は極めて一般的であり、自動機械においても生きた有機体においても、あらゆる



制御系に見られる。

生体における調節、中枢神経系における調節は、負の戻りの通信を基礎として行なわれるということは、サイバネティクスの基礎的な仮説である。この仮説を検証する多くの事実がある。頭をきりとったかえるの足に、酸をしめした紙片をのせると、かえるは第三の足でそれをおとす。しかし、この足をおさえると、かえるは最初の足でこの紙片をおとす。この実験で無条件反応は、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戻りの信号ももつて変ったものである。

有機体がおかれてある条件の恒常性の維持のために、戻りの通信は重要な意義をもっている。人間にとって体温、血圧、血液中の糖分の含有量などが不変でなければならぬ。中枢神経系はこの恒常性をつぎのようにして維持する。すなわち、標準からのずれ、たとえば室内の温度上昇、血圧の上昇は、中枢神経系に信号を送り、神経系はこの情報を、作業器官——心臓、血管、肝臓等——に伝えられる運動刺激に作り直す。しかしこれが、望む結果たとえば標準血圧への復帰に導かれるためには、戻りの通信が参加する。すなわち、器官の中に発生する実際の変化について通報する信号が、中枢神経系に伝えられる。

戻りの通信の役割は、人間の反射運動において顕著である。スキーヤーは、希望する速さで走るために、場所の起伏や雪の状態のいかによき、さまざまな努力を払うようにする。彼の中枢神経系には、運動の速さについての情報を戻りの信号が伝えている。速さが小さければ、努力が大きくなり、速さが十分であれば、速さと運動

が持続される。

自動機械と生きた有機体とに共通な戻りの通信の原理は、偶然的にあらわれるものではない。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は、さまざまな特色をもっていなければならない。これらの反応が、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、相当した信号が必要である。戻りの通信は、中枢神経系の機能の復元と再組織の基礎になっている。

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いわゆる迷走神経とを縫合する。もし戻りの通信の助けがなければ、この手術によって足肢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、内部器官の呼吸運動その他の運動とともに、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及ぼさないように、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戻りの情報を受けとった結果おこなわれる。

もう一つの例をあげる。病人が頭に重傷をうける。その結果、感覚が乱され、運動が損われる。制御が効を奏しない。すなわち、中枢神経系を受けとる戻りの刺激はあまりに弱く、中枢神経が運動器官の動作に、相応した「修正」を与えることができない。どのようなにしたらこのような戻りの信号を強めることができるかという問題

が、これと関連しておこってくる。これは、ゴムひもあるいは堅い環の助けをかりて達せられる。ゴムひもや環で、手や指をかたく締めると、筋から中枢神経系に行く痛みの刺激が拡大され、その結果戻りの信号が回復し、運動が常態になる。

戻りの通信は、人間においてはそのすべての器官の常態な働きを保証しながら、絶えず作用している。神経系の活動に何らかの攪乱が起ったとき、とくにその意義が重要である。

われわれの運動はすべて慣性（惰性）の法則にしたがう。しかし、これは、普通あらわれない。それは、筋、腱、関節、内耳に分布している神経から、予定した運動からのずれについての信号を小脳が受けとり、運動を常態に戻すための適当な命令を送るからである。小脳が障害をうけると、戻りの通信を基礎とする運動の調節は破られ、そのとき惰性が現われ、とくに、目的物に対して過度な運動として現われる。

小脳に障害をうけた病人は、目的物をとらうとして、指を必要以上に広げ、あまりに強くつかむ。こわれやすい物はつぶれる。テーブルの上に物を置こうとして、テーブルをたたく。これはすべて小脳が運動の修正を行なわなければならないために見られる運動の惰性の結果である。このような病人は、円や曲線を画くこともできない。それは、運動の惰性によって適時に手を停止することができず、手が必要な個所からそれ動き、折線を画くからである。小脳に障害をうけた人間は、ごちない運動となめらかなでない言語が特徴的である。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

一そう大きく修正するため、一そう大きな反対の運動を行なうことが必要である。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、なめらかなものではなくなり、断続的な振動する運動になってしまう。言語器官においても、同様な現象があらわれ、会話は断片的な調子に変わる。

同様な戻りの通信の障害は、機械にも見られる。例えば、調整の不完全な自働舵においては、戻りの情報の遅滞をまねき、航路からのずれが修正されず、惰性によって温度のずれが生じる。また修正のための運動も同様に必要なときに回復できず、必要以上に強くなり、船は航路の安定を失い、航路からそれしてしまう。

このようにして戻りの通信の紊乱は、系の破かいになり、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、正常に機能を果している戻りの通信は、系の組織を保持し、そのエントロピーの増大をふせぎ、変化する外部条件への系の適応を保証する。

三、サイバネティクスと神経系

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、人間の神経系の機能の理解にとって、大きな意義をもっている。サイバネティクスは、生理学者と心理学者に研究の初めの段階で利用できる研究方法を与えるものではないが、新しい仮説を提起し、その検証のための可能性を与えている。

サイバネティクスが出現するまで、生理学と心理学において到達された研究手段は局限されていた。神経組織を確かにする手続は、中枢神経系の活動状況を正しく調べることができない。心理現

象の主観的研究方法すなわち自己観照の方法によつては、脳の活動の動作状況を見ることができない。そのために、生理学も心理学も、アナロジーの方法による神経系の活動の法則の解明のために、技術的につくられるモデルに目をむけたことは当然である。正にこれは、心理学と生理学の分野における重要な開発である。デカルトは、機械の働きのアナロジーによつて、当時、反射の思想を提起した。バヴロフは、自動電話局の接触器の活動とのアナロジーによつた。

自動調節のサイバネティクス機構を創ることによつて、生きた有機体に最大限に近接したモデルを根拠として、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。しかしモデルは、神経活動の研究の過程で、生理学と心理学の前進を促進するような仮説を提起することを可能にする。たとえば、盲人のために、印刷したテキストを読むことをモデル化した装置がつくられている。この装置の要点は、印刷されたテキストを、音の順序に自動的に翻訳することである。この音は、真の話の音声として表現されるのではなく、盲人が会得する特別な略号（各文字に相当する一定の音の振動）である。この装置は、脳の皮質の視覚中枢の通信連絡の模写の原則に従ってつくられていないにしても、この装置の構造が、それに酷似していることが重要である。

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。電子機械においては、その系の中で経過するプロセスを直接に観察して、系の内部をのぞき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、機械の常態の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。例えば計算機が、何らかの偶発的な原因によって、たまたま、全く同一の演算のサイクルを果しなくくりかえし、次の演算に移れないことがある。機械の働きのこのような破かいは、人間の病的状態だけでなく常態においても現われる或る精神現象のモデルである。たとえば強度に興奮しているか或いは疲労した人間には、あたかも、ある期間、他の一さの意識内容を排除するかのようになり、或る思想や追憶が、念頭から去らない強迫観念のような性格をもつことがある。このような状態は、病的な場合には、心理的現象の停滞をひきおこし、強迫観念は長く人間の意識を占領し、そして人間の行為の基礎となる。迫害妄想、誇大妄想、自殺狂は、このような病的状態の例である。バウロフは、これらの原因は、脳の皮質のどこかの領域に、興奮の停滞した局所が発生したものであると考えた。機械とのアナロジーによって、このような停滞した局所の発生の、他の原因を研究する可能性が得られる。これは、同一の道に沿ってインパルス（刺激衝動）が長期にわたって循環する結果であろう。循環するインパルスは、多数の神経細胞をとらえる。これに拘束されない比較的小部分の神経細胞は、情報を処理することをやめ、それに相応する反応を組織する能力を失ってしまう。

生理学者、心理学者、医師、精神病医は、常に、外部的現象の観察によって内部的プロセスの性質に診断を下す問題に直面する。しかし、これは決して容易な問題ではない。サイバネティックスは、この問題の解決のために数学的・論理学的手段を指示している。ネ

ウロン（神経細胞）の間の連絡と生理的プロセスは、記号論理学によって記述できることは、明らかである。ネウロンの状態は、ある文論理命題として記述され、そしてすべての生理的プロセスは、これらの命題の連けいとして記述される。ネウロンの状態は、「オール・オア・ノー」の法則（悉無律）に従い、これは論理的に、命題の真或いは偽として表わすことができる。そしてまたネウロンの状態の間の関係は、命題の論理的な連けい（選言、接合、その他）として表わすことができる。

入ってくる信号、すなわち最初の指示は、つねにわれわれに知られている。出ていく信号、すなわち最終の指示も同様知られている。ただ、その結果が最終の指示となる中間の改造のシステムを心に描くことが残るだけである。現在すでに、この方法を利用して論理学的方法によって、ネウロンの連絡の図式がつけられている。このように、教授（条件反射の成果）や一般化の神経系における情報の伝達、基礎にあるプロセスの論理的記述がつけられている。このような図式の論理的構成は、もちろん実験生理に代えることはできない。しかし、それにもかかわらず非常に重要な力を与えている。

サイバネティックスは、外部的なデータを基礎にして計算機の破損を判断することができるような数学的方法を研究する。医者は、これに類似した問題に直面する。すなわち、外部的な徴候を基礎にして、病気の性質を確かめることが求められる。医学は、サイバネティックスに立脚し、この問題の解決のために、サイバネティックスによって研究された方法を適用する。

またサイバネティックスによって、高次神経活動の型のモデル化が可能になる。バウロフによれば、動物と人間の高次神経活動は、多くの特殊性によって区別される。その特殊性の一つは、第一に、神経プロセスの活動力である。これは強い興奮を保持し、それに正しく応答する神経系の特質による。第二に、神経プロセスの平衡状態、すなわち、興奮と抑制のプロセスの大きさの相互関係が、ここに関連する。第三に、神経プロセスの特徴である一つのプロセスから他への交替が行なわれる速さ、活動性が関連する。これらの特殊性のさまざまな連合によって、高次神経活動の相異つた類型が構成される。この高次神経活動の類型によって、有機体の外部条件への適応の性質と速さが決まる。これが、人間の性格と能力の生理学的基礎である。

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、神経系の類型の特質を正確に算出することが容易になる。高次神経活動の特質をときに想い起すような特性が、機械の中で起り、それが正確に計算されることをわれわれは知っている。もちろんモデルは、高次神経活動の諸類型の本性と独自性を再現するものではない。しかしそれは、高次神経系の諸類型の中にあるものと、任意の自動調節系一般の活動の特質の中にあるものが、共通していることを示している。またこれによって、この神経活動の諸類型の一そう正確な分析ができるようになることを保証している。

高次神経活動の研究にとってサイバネティックスの重要性は、中枢神経系の機能をモデル化する機械の利用だけにとどまらない。サイバネティックスによって研究された制御の原則は、生理学と心理

学的发展にとって、大きな役割を演じなければならぬ。サイバネティックス的研究の数学的精密さは、脳の活動を、質的側面と量的側面から研究することを可能にしている。

情報理論の問題の一つは、制御のために必要な伝達される情報の量の算定である。この問題には、もともと経済的なコード（略号）の作成、系の中の信号の保存の問題、防害に対する抵抗、系の情報の容量を増大する方法の研究の問題が関連する。

神経系の活動の分析に、情報理論の量的な方法を適用する問題は、現在すでに実際的な成果をあげている。外部の影響を知覚する感覚受容器の数は、伝達される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。

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が確認されている。ソビエトの生理学者、ゲルシュニの実験によれば、情報量が増大するとともに、反応の停滞の時間が大きくなるという。また情報の知覚と変更に最大速度があること、そして情報の超過は、まちがった反応をひきおこすことなどが明らかにされ、これはとくに重要な成果である。このようにして、情報には最適な量があり、この最適にに応じて情報は、中枢神経系により、もつともよく改変されるのである。

（東京工業大学助教授）