

サイバネティクスと教育学

長谷川 淳

二、サイバネティクスの基礎的な概念と法則

1 サイバネティクスの系

機械と神経系に共通な制御の法則性を研究するために、サイバネティクスは、多くのものに一般的に適用し得る概念を用いなければならぬ。脳髓と関連して真空管、穿孔カード、録音テープについて述べ、また機械と関連して、大脳皮質や髓質、または灰白質や白質について語ることは、奇異に思われるかも知れない。この関係の概念はサイバネティクスの概念的であるというよりはむしろ、機械と脳髓だけに関係し、サイバネティクスにとっては、もっと一般的に、あらゆる対象に適用できる概念が重要である。

脳髓も機械も一定の要素から成り立ち、それらの諸要素が総体で単一の完全な系を形成する。系という概念は、サイバネティクスにおいて最も重要なものの一つである。系は広義においては、諸要素のすべての総体を意味する。この概念は、全体として全宇宙に対して適用され、同様にまた部分的にその個々のものに対して適用で

きる。人体、原子、機械等、これはすべて相異なつた系である。これらは皆、相互に相異なっているが、諸要素の総体であり、すなわち系をなしていることが、その共通の特徴である。

一つの系は、他の系を自分の中に含んでいる。人間の有機体は、血液循環系と神経系を含み、分子は原子をその中に含む。

各系は、種々の状態の集合状態にある。たとえば人体は系であり、人体が行なう運動はその状態である。それと全く同じ関係が、機械についても成り立つ。機械は、あるいは静止の状態にあり、あるいは、さまざまな操作を行なつて運動状態にある。系の一つの状態が他の状態に変わる。人間は、座り、立ち、歩き出す。これはすべて、一つの状態から他の状態への移行をあらわす運動の一定の系である。

類似の現象は、人工的な系においても見られる。鋼塊に加熱すれば、温度状態に連続的な変化が起る。また旋盤で部品を削る場合に、部品の状態の変化の系を見ることが出来る。

しかし各系にとって、その変化の可能な、一定の限界がある。変化がその限界をこえると、その系は他の系に変化する。変化が、指

示された限界以上に出なければ、その系は他のものに交らない。ただ自分の状態を変えるだけである。たとえば人間の有機体の、正常な生活機能は、一定の温度の限界内でのみ可能である。同様に任意の固体は、ある一定の温度の限界内でのみ状態を保っている。その限界をこえると、氷が水に、鉄は熔融した鉄になるように、その物質は、液体状態に変わる。

一つの系が他の系に変わるプロセスそのものは、また一定の系である。このように、いろいろな年齢段階における全く同一の人間、幼児あるいは成人が、相異なる系と見なすことができるが、また幼児から成人への発達は、一つの系から他の系への移行のプロセスと見なすことができる。原子と、核分裂した原子とは、相異なつた系である。原子が破かいされるプロセスは、一つの系他の系への移行である。

各系は、他の多数の系に移行することができる。種子は、発芽しあるいは死滅し、強い植物にあるいはやせた植物に変化する。例えば、横浜から東京への自動車の運動を、はじめの系と見なすならば、その系は、着京後、東京からの道の数だけの方向をとり得る。

系の変化は、さまざまな原因の集合によって引き起こされる。これらの原因は、その系が存在する限界から系を引き出し、系を破かいする傾向をもっている。例えば風や温度は雲を破かいし、摩擦や負荷はモーターを破かいする。人体のはげしい活動の際、人体内に有害な物質が蓄積されたとき、体温があがる。

しかし系が、破かいた的影響に対して適応作用をする力をもっている場合、系は保存される。たとえばわれわれが映画を見に出かけ

る決心をする。この目的実現の道程において、この目的達成に必要な運動の系を破かいするおそれのある一連の外的障害がおこる。途中で友人に会つて呼び止められるかも知れない。交通機関に道をさへぎられ、それを待たなければならぬ。ショットウィンドウに注意をひかれ立ちどまるかも知れない。運動の継続を破らないために、設定した目的を達成するために、その目的実現の全道程にわたつて、この目的を保持しなければならぬ。これが、制御のプロセスにほかならない。脳に異常な障害部分をもっている人間は、簡単な行動さえ遂行することができない。外部的な影響に対して適応反応をすることができない。診療室から出ていくとき、側を通るつもりで戸棚に突込むかも知れない。

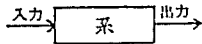
このように、破かいしようとする力に対してその体制を保持し、それに抵抗することができるような系だけが保存される。

発達した動物の場合も人間の場合も、中枢神経系・脳髓が、制御の機関である。人間の脳髓は、有機体に起るプロセスを制御するばかりでなく、自然の力と社会の発展を制御する。自然は、生きた有機体だけにある制御の機関を創つた。しかし技術の発達とともに、人間に代つて制御の機能をはたす機構が創造された。

人工的な制御機構は、人間の脳髓と同様に、自動制御系の全く同一の部類に属する。この種の自動制御系はすべて、サイバネティクスの的であると言ふ。

サイバネティクスの系は、ある単一の、完全なものとして、環境から相対的に独立している。たとえば人間を構成している諸要素の総和は、ある程度まで自立して生存して、他の系から独立し

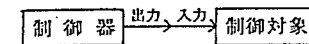
サイバネティクス 1964, 2月 No.16



ているものとして語る事ができる。しかし、それとともに、各系は外界と結びついている。外界は、ともかく系に影響を与え、また系の側からの影響をうける。外からの影響を把握する系の部分を入力とよび、その系が他の系に作用する部分を出力とよぶ。これを図式的にあらわすと上のようになる。一つの系には、一つあるいは二つあるいは数個の入力と、それに相当する数の出力があり得る。たとえばワットの調速機には、一つの入力と一つの出力がある。入力には、圧力の変化が作用し、出力では弁の開閉がおこなわれる。人間には、外部の影響を知覚しそれを調節する神経細胞の形で、多数の入力、出力がある。

* これは、蒸気機関の軸につながつた縦の軸があつて、その回転が速くなると球のついた二つの腕が遠心力でひろがり、その腕と連結した部分が上にあがり、それによってリンクを通して弁を動かして蒸気の通る道を狭くして速度をおそくする。回転速度がおそくなれば、球が下り、弁を開き、蒸気の供給を多くし速度をあげる。

これは一種のフィード・バック機構である。これをカバナーと言ひ、この語源は、ラテン語の「グベルナートル」から来たもので、サイバネティックスの語源であるギリシャ語の「キニューベルネーテス」と同じものから来ている。



このように、すべてのサイバネティックスの系は、自動制御系である。この系は、常に、制御する部分と制御される部分とをもち、制御する部分の出力は、制御され

る部分の入力と一定の仕方では結合されている。図で示すと、上のようになる。

2 悉無律(オール・オア・ノー)

入力と出力が二つの状態をとるサイバネティックス系が、もつとも簡単に、もつとも一般的なタイプである。このような系は、たとえばサーモスタット(電気こたつについで)である。この場合、入力と出力は、二つの状態のうちの一つをとる。温度が標準より低いか高いかにより、電熱の回路が閉ぢるか切れるかする。電子計算機は、同じ型に属する。電子管の入力と出力は、普通か否かの二つの可能な状態のうちの一つをとる。われわれの脳はどうか。同じタイプのサイバネティックス系に結びつけられ得るか。

脳のある部分が外部的な刺激の影響のもとに、それに相応した「命令」を動作機に送り、また返されるといふことを知っている。外からの影響がない場合には、興奮はない。脳は全体として、多くのさまざまな神経細胞——ニューロンから成り立っている。これは、ある瞬間に、あるいは興奮状態に、あるいは非興奮状態になる。ニューロンが興奮するためには、刺激の力が、一定の限界の大きさに達しなければならぬ。この刺激に対して、ニューロンは、ただちに最大の興奮で応答し、刺激の力がそれ以上増大しても、興奮の強さが増大しないようにする。この現象は生理学で、悉無律(オール・オア・ノーの法則)として知られている。ニューロンの興奮は、新しい刺激が再びそれを興奮状態に導かならぬ限り、つぎに興奮しにくい性質の状態にかわる。

このように、ニューロンと電子管とは、あらゆる点で物質的な相違

と特殊性をもっているが、少くとも一つの関係では、相互に同じである。即ち、双方とも二つの可能な状態——通っているか否か、興奮しているかいないか、イエスカノーカ——の一つをとる。サイバネティックスは、系の諸要素間の、この関係以外のことはすべて捨象する。一つの要素は入力であり、他の要素は出力である。それぞれの入力は、相応した形式で出力の状態を定め、あるいは興奮状態になり、あるいは非興奮状態になる。知覚し、動作する神経細胞の興奮が脳の活動を決定すると同様に、入力と出力の興奮の組合せによって、自動機械の動作が定まる。

3 情報

外部的影響に対して自分の反応を制御し、入力に受けとるものに従って出力に生じるものを調整することが、以上のようなすべての系の基本的な問題である。

制御機構は、この問題を処理するために、系がおかれている条件について、またその系に生じた変化についての報知あるいは情報を受けとらなければならない。続いて、受けとった資料をもとにして、動作機構のために新たな情報を作らなければならない。情報は、系の外で、また系の中で生じている出来事についての通報である。情報の交換は、自然界においても人間社会においても広く行なわれている。情報は、われわれの感覚器官への、外界の対象と現象の直接の影響により、また本、新聞、話など間接の方法によってわれわれが受けとる外部世界についてのすべての資料である。情報はまた、制御装置、自動調整機によって知覚される系のすべての変化についての通報である。情報は、人間と、人間が仕事をする装置との

間にも交換が行なわれる。人間は計器によって、温度、圧力、速度等についての情報を受けとる。計算機に、問題の条件を示した情報を入れて、人は機械から、問題の解や結果その他の情報を受けとる。機械はまた情報を交換することができる。ワットの調速機は、ボイラーの蒸気の圧力の変化についての情報をうけ、弁の開閉機構に、相当した情報を送る。

では、情報の伝達は、いかにして行なわれるか。情報の信号の役をする何らかの物質的な媒介者なしには、どんな報告も伝達することはできない。放送局は、電波の仲介によって受信器に情報を送る。聴取者は、ラジオ受信器から、音波によって情報を受けとる。そして最後に、人間の聴覚器官から脳に、神経細胞を通して情報の伝達が実現される。思想の信号は、音声あるいは文字の、一定の総和である。赤信号は、運動の停止を警報する。

信号の重要な特質は、それを伝達する報知と、それを発生するためのエネルギーとが、依存関係をもたないことである。全く同一の情報で、大きな力の信号でも伝えられ、小さい力の信号でも伝えられる。信号そのものの発生には、一定の最少のエネルギーを消費することが必要である。しかし情報の大きさはそのエネルギーが、どれだけ小さいかに依存しない。その情報の大きさは、信号伝達の際に、この最少限度以上の量のエネルギーが消費されるとしても、その大きさは少しも変らない。たとえば焚き火は、何らかの行動の開始の信号の役をする。その火が適当な場所から見られるなら、どれだけ大きいか小さいかに関係がない。大声で出される命令は、やっと聞こえるような低い声の命令と同じように同一の情報を

伝える。もちろん命令の実行のいかんは、ある程度命令者の力や声の調子に依存するが、これは情報には関係なく、命令が与えられる人間の心理に關係することである。いづれの場合も全く同一の情報を受けとるのである。非常に重要な報知が、しかし、小さな弱い信号によって送られる。ただ信号の内容は、そのエネルギーによって決定されるのではなく、信号がはこぶ情報の量によって決定される。

では、情報の量とは何か。いかにしてそれを測定するか。サイバネティクスは、広く数学的方法を用いる精密科学の「数」に關係をもっている。数学的方法は、情報の概念の分析に適用できるであろうか。この問題の解決は容易ではなかった。数学は、情報のあらゆる側面の本質を説明することはできない。にもかかわらず情報の数量的研究の面で多くの研究が行なわれた。一連の学者、とくにアメリカの数学者・工学者、クロード・シャノンの研究によって情報の量的理論が確立された。

情報を受けるということは、以前には知らなかったことを知ること、あるいは以前に少ししか知らなかったことについて、もっと多く知ること意味する。しかし、知らなからるは少し知ってゐるとはどういう意味か。われわれの前に一連の可能性があり、その各々が等しい確率をもつてゐるとき、最終結果がどうであるかを、知らなからるは少し知つてゐると言う。例えばさいころの六つの面のどれが等しくあらわれる可能性をもつてゐるとき、それを投げたときどの面があらわれるかを知ることができない。しかし、もし一つの面が大きかったり重かったりして、各面のあらわれ

る可能性が等しくなければ、どんな結果があらわれるかについて知ることが、はるかに大きい。

情報の量的な定義は、以上に述べたことと同様な考え方を基礎にしてゐる。ここで確率の概念が利用される。しかしここでは確率について詳述することは省き、ただ情報理論の基礎的概念を説明するために必要な、若干の簡単な紹介にとどめる。

4 確率

確率は数である。確実な出来事、すなわち必ず起るはずの事象の確率は1に等しく、決して起ることのない不可能な事象の確率は0に等しい。

貨幣を投げると、必ず表か裏のいずれかが出る。表か裏のどれかがあらわれる確率は、1である。この場合、表の出る確率(表)と裏の出る確率(裏)は等しい。したがって、

$$p_T = p_R$$

* 確率は文字で表わされる。ラテン語の Probabilis (確からし) あるいは英語の Probability (確からし) の頭文字

ここに、表か、あるいは裏が出る確率の数的な意味を定義することができよう。

$$p_T + p_R = 1, \quad p_T = p_R \text{ ならば}$$

$$p_T = \frac{1}{2}, \quad p_R = \frac{1}{2} \text{ である。}$$

さいころをふつて1の目が出る確率(1)は、他の目が出る確率に等しい。すなわち、

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6$$

この場合、 $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 1$ である。
したがって、 $p_1 = \frac{1}{6}, p_2 = \frac{1}{6}, \dots, p_6 = \frac{1}{6}$

確率の意義は、全く客観的で、われわれがその事象についてどれだけ知つてゐるかに依存しない。たとへば、さいころの2の目が出る確率は $\frac{1}{6}$ で、貨幣の裏の出る確率が $\frac{1}{2}$ である場合、貨幣について3倍多く予知してゐることを意味するものではない。確率の差違は、知識の差違によって算定されるものではなく、問題にしてゐる対象と現象の、さまざまな客観的な本性によって決定される。さいころの各面に比較して、貨幣の裏の出る確率の大きいことは、立方体には面が6つあり、貨幣には、外縁を除けば、面が2つあるというところによって決まる。

ここで問題にしてゐるのは、等しく確かな可能性のことである。しかしあらゆる事象は、決して等しい確率をもつものではない。もしさいころの面にかたよりがあれば、ある面の出る確率は、もはや $\frac{1}{6}$ に等しくない。その確率がいちじるしく大きくなると、他の面に出る確率は減少する。この場合の確率の変化は、さいころの構造によって決まり、われわれがその事象について予知してゐる知識によって決められるものではない。

ある事象の確率が大きければ大きいほど、その事象の到来を正確に予言することが容易である。一つの事象の到来の確率が1であるとき、残りのすべての事象の確率は0で、その事象の到来を完全に予言できる。確率が最大であることによって、予言の正確さを最大に保証することができる。反対に等しい確率の場合には、可能な事

象の一つの確率が、他のすべての場合の確率よりも大きい小さいかを算定することはできない。この場合の予言は、全く不定であり、その正確さは最小である。

では、予報の不確実さの量的尺度は何か。上述のことから明らかのように、不確実さは、可能な結果の数が増大するとともに増大する。試行の結果の不確実さの、もう一つ重要な特質は、もし試行がいくつかの部分から成り立つとすれば、全体の不確実さは、各部分のもつ不確実さの総和によって決定されるということである。

試行の結果の不確実さの特徴は、数量的な尺度であらわされなければならぬ。すなわち、不確実さをあらわす大きさは、つぎの二つの条件をみたさなければならぬ。

- (1) その大きさは、可能な場合の数の増大とともに増大する。
- (2) いくつかの試行の不確実さをあらわす大きさは、それらの各の不確実さをあらわす大きさの総和でなければならぬ。

このような尺度として、可能な場合(結果)の教自身をとつてもよいだろうか。これは第一の条件をみたすことは明らかである。しかし第二の条件をみたしてゐるだろうか。以下次回において検討する。

追記、前回の註記(第一五号、九八頁、下段、終りから七行目)藤村増氏の同書の電機大助教授は誤りで、電気通信大学教授です。訂正いたします。

(東京工業大学助教授)