

情報と現代科学

——情報概念の展開とその意義——

立木 教夫

目次

- 一、はじめに
- 二、情報をいかにとらえるか
- 三、情報と諸科学
- 四、情報の二つの定式化
- 五、むすびにかえて——情報概念の導入の意義

一、はじめに

情報と現代科学

二十世紀もあと残すところ十年足らずとなった。今世紀における自然科学の最大の成果は何か、と問うてみるなら、何と答えるべきであろうか。二十世紀になって初めて得られた科学技術の成果としては、例えば、高エネルギー物理学におけるクォークの発見、人工衛星の打ち上げからスペースシャトル計画にいたる宇宙開発、遺伝子組み替え技術の開発・実用化によるバイオテクノロジー、脳死という新たな死をもたらした人工心肺をはじめ

とする人工臓器、ロボット技術、コンピュータ等、様々な先端科学技術が挙げられよう。

しかし、二十世紀自然科学の最大の成果は、「情報」概念の導入と展開である、と答えるべきであろう。その理由は、それが一つの理論や技術の成果としてもたらされたものではなく、我々の宇宙を構成する基本概念として導入・展開されてきたからである。

情報という概念をはじめて自然科学に導入したのは、一九二八年、ベル電話研究所のハートリーである。⁽¹⁾ またその翌年の一九二九年には、物理学者レオ・シラードが、「知的存在の関与による熱力学的体系のエントロピーの減少について」⁽²⁾と題する論文において、情報とエントロピーの関係を論じている。このシラードの論文は情報理論の先駆であったが、当初ほとんど注目されることがなかった。情報が本格的に問題とされるに至ったのは、通信工学やサイバネティクスにおいて、情報量とエントロピーを結合した議論が登場してからであり、これは一九四〇年代のことである。

このように自然科学の領域において導入された情報という概念は、今日では、自然科学だけでなく、広く、社会科学や人文科学においても用いられるようになってきた。しかし、情報という概念の定義をある程度明確にした上で使用しているわけではない。情報という言葉がもつ意味の広がりの中で、利用し易い局面に着目し、展開を試みているのが現状である。しかしそれでも、情報という言葉が引き合いに出される場面では、情報の本質的意味をとらえている場合が少なくないのである。現在は、従来、細分化に細分化を重ねてきた諸科学が、情報という共通項を媒介として、ゆるやかな統合を目指し得る段階に到達したという、非常に興味深い時期なのである。本章では、まず、二において、この情報という概念がもつ基本的意味を明確にする。三において、情報概念が科学に導入されるに至った過程でなされた様々な学問領域からの貢献を概観する。四において、情報概念がいかに

にして定式化されたのかを探り、その定式化がもっている問題点を指摘し、ごく最近、ストウニア⁽⁴⁾が行った情報の実在論的定式化によって問題点解消の方向を示す。そして五において、情報概観の導入がもつ意義について述べる。

〈注〉

- (1) R. V. Hartley, "Transmission of Information," *Bell System Technical Journal*, Vol. VII, 1928. intelligenten Wesen," *Z. Physik*, 53, pp. 840-856, 1929.
- (2) Leo Szilard, 1898-1964. ハンガリー生まれのアメリカの物理学者・生物学者。 (4) Tom Stonier, 1927. ストウニア教授は、イギリスのブラッドフォード大学の「科学と社会部門」のファウンデング・チェアー職にある。
- (3) Leo Szilard, "Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen

二、情報をいかにとらえるか

(一) 科学的・パースペクティブにおける情報

科学の歴史において、情報という概念の登場は、どのようにとらえられるのであろうか。

十七世紀に始まる近代科学は、「物質」↓「物質+エネルギー」↓「物質+エネルギー+情報」と、その基本概念を拡大してきたといわれる。この経過を踏まえて、まずはじめに物質が見えられ、次にエネルギーが見えられ、

そして最後に情報が発見されたとするのが、常識的見解である。

はたして、このような解釈でよいだろうか。

問題は、近代科学の成立過程と関係している。近代科学の成立過程において採用されたプログラムは、できるだけ基本概念でもって世界を記述しようということであった。「基本的にこの世界を物質と運動だけで記述しようとした」⁽¹⁾デカルトの試みは、その代表である。そして、このようにして取り出した「物質から、純粋に物質のみに本質的(と思われる)な属性、言い換えれば、物質そのものに本来的に備る属性だけを残して、他の贅肉をすべて殺ぎ落とす、という作業が追究された」⁽²⁾のである。

この物質と運動をもって、すべての自然現象を説明していこうというのが、近代科学の壮大なプログラムであった。しかし、このプログラムの進行に従って、物質と運動のみによる説明法の限界が明らかにされていった。はじめに必要となったのが、エネルギーである。そして更に必要となってきたのが情報である。それ故、発見に続く発見を重ねて情報に到達したというよりも、「捨てるに早計に過ぎたものを、更めて確認しながら回復していこうとする経過」⁽³⁾として、エネルギーや情報が導入されたのだと理解すべきであろう。

このようにして、最後に導入された情報によって、「物質+エネルギー」の構図ではとらえきれなかったが故に、科学的考察の対象から外されてきた様々な問題に、新たな光が当てられ、新たな枠組みのもとに、問い直しが行われつつあるというのが現在の状況である。

(二) 情報をどのように定義するか

さて、これまで情報という言葉に定義を与えることなく使用してきた。ここで情報の定義を問うてみることにしよう。この言葉は、各方面で多用されているにもかかわらず、その基本的意味は今一つ判然としない。情報を研究している専門家の間でも、未だ「情報とは何か」に関する共通認識は得られておらず、情報の定義を確定する問題は、「情報の研究の中でいちばん難しい問題で、ちゃんとは答えられない」とか、「情報の全貌がわかるのは、情報の研究がすんだあとである」といわれている。⁽⁴⁾ちなみに、最新の『岩波情報科学辞典』(一九九〇年)を開いてみても、情報という独立項目はない。

そのために、ここでは、情報という言葉の意味を語源的側面から探っていくことにする。どの辞書を見ても、漢字の「情報」が、いつ頃からどのような形で使用され始めたかは、記されていない。この問題は、未だ定説が得られていない研究事項なのだということを知った次第である。つい最近、神戸大学の小野厚夫教授がこの情報の語源に関する研究成果を報告された。その報告によれば、「情報」という言葉の起源は明治九年までさかのぼること、語源は兵語で、その原語はフランス語であることがはっきりした⁽⁵⁾という。陸軍少佐酒井忠恕訳『仏国歩兵陣中要務実地演習軌典』(明治九年出版)において、「敵情の報知」「敵情の報告」を意味する言葉の訳語として用いられたということである。そして、「戦後、情報理論が日本に導入されたときに、informationの訳語として充当された経緯があり、「情報」という言葉は、二度西洋語の訳語として造語されたこととなる」と記している。⁽⁶⁾我々は確かに、情報という語をこの二つの意味で使用し、混乱を来しているということとはなきにしもあらずである。

我々が問題としている情報は、informationの訳語としての意味であるので、次にそちらの語源的意味について調べてみることにする。

英語の information は、action of informing と云うことであり、はじめから action、つまり作用の意味が込め

られていることに注意する必要がある。さて、次に inform である。この語は、ラテン語の informare に由来する。この語における in- は、英語では in, into, within, on, towards, against とするものであり、これに forma が加えられている。この forma は、英語では shape, form an idea of, describe という意味をもつ。そして informare は give a character to, imbue, inspire; furnish with knowledge; give knowledge of a thing to; instruct in という意味を持つてゐる。⁽⁶⁾

ここにおいて、情報という言葉の多様な用いられ方をある程度統括する知見が得られた。インフォメーションは、フォルム(形式)を与えるということから、インスタラクトする、教えるという意味まで包含している。つまり、カオス的な状態があつて、そこに形と秩序を与えること、いわばエントロピーの少ないものを形成するということで、そこに意味とか価値と連動する側面が、あらわになってくるのである。⁽⁷⁾ インフォメーションという言葉の核心には、「形を与える」とか「秩序を与える」という意味が存在しているととらえてよいだろう。

古来、このような特質を担うものとしては、「形相」⁽⁸⁾、「 pneuma」⁽⁹⁾、「 pneuma」⁽⁹⁾、「 pneuma」⁽¹⁰⁾があつた。十七世紀以降の近代科学の発展の中で、まずはじめに切り捨てられたのはこのような概念であつたが、二十世紀の科学の発展の中で、これらの形相、 pneuma、 pneumaなどが持つていた、「形を与える」とか「秩序を与える」という働きが、情報という概念と連動して、再び問い直されているのである。自己組織性といった問題が、情報とのつながりで問題にされているのも、このような背景的事情があるのである。

〈注〉

- (1) 菅野道夫・中沢新一・村上陽一郎「ファジィと現代思想」、中村雄二郎他著『ファジィ——新しい知の展開』、日刊工業新聞社、一九八九年、九六頁。この引用は、村上陽一郎教授の言葉である。
- (2) 村上陽一郎「物質・生命・人間」、『新岩波哲学6 物質・生命・人間』、岩波書店、一九八六年、一〇頁。
- (3) 前掲書、一〇頁。
- (4) 清水博・餌取章男著『生命に情報を読む』、三田出版会、一九八六年、一一頁。
- (5) 小野厚夫「明治九年、『情報』は産声」、『日本経済新聞』、一九九〇年九月十五日朝刊。ちなみに諸橋徹次著『大漢和辞典』(大修館書店、一九七一年)を引いてみると、「①事情のしらせ。②戦時において、敵国に関する報告をいう」とあるだけである。これが漢語か和語か判然としなかつたが、小野教授の研究により、これが明治時代に作られた和語であることが明らかとなつた。
- (6) The Oxford Dictionary of English Etymology, Oxford University Press, 1966.
- (7) 藤沢令夫「科学技術と人間」、『科学技術の開発と新しい社会』、岩波書店、一九八三年、一四一頁。
- (8) 例えば、材木が家という存在の質料とすると、「家」の概念にかなつた構造上の形や機能はその形相である。それは家を建てる場合、その計画のうちに観念として存在し、素材を得て現実に存在するようになるもので、現実に存在する個々のものは、このように、形相が単なる可能態としての質料を限定することによって成り立つと考えられる。「形相」『哲学事典』、平凡社、一九七一年、参照。
- (9) 生命の原理とみなされ、非肉体的な霊気で、呼吸によつて体内にとりこまれ血管によつて体の各部分に運ばれると考へられた。(更に詳しい説明は、坂本賢三「 pneuma」『科学史技術史事典』、弘文堂、一九八三年を参照されたい。)
- (10) 生物体を魂と肉体とからなると考えたときの魂のことである。プラトン、 pneumaを「自分で自分を動かすもの」と定義した。(更に詳しい解説は、坂本賢三「 pneuma」『科学史技術事典』を参照されたい。)

三、情報と諸科学

情報の定式化がなされたのは、二十世紀に入ってからのことである。はじめ情報の数理的定式化が手掛けられ、後に物理的定式化が問題とされた。数理的定式化が確定したのは、一九四〇年代後半のことである。この成果を得るためには、それに先立って蓄積されていた様々な学問領域における知見が、大きく貢献している。ここでは、物理学、数学・論理学、工学とりわけ通信工学とサイバネティクス、生理学・心理学、生物学における発展を跡付けながら、情報という概念が明瞭化してきた背景を概観する。⁽¹⁾

(一) 情報と物理学

まずはじめに、物理学における「物質」↓「物質＋エネルギー」↓「物質＋エネルギー＋情報」という発展の経過に注目してみよう。

近代科学成立の時点で、世界を記述するための手掛かりが、物質に絞られたことについては述べた。物質を科学の中に取り入れるに際して、概念の抽象化が行われた。ニュートン力学における「質点」⁽²⁾や、化学革命を成就したラヴォアジエの「元素」⁽³⁾などは、その代表である。これらは、「物質そのものに本来的に備る属性だけを残して、他の贅肉をすべて殺ぎ落とす」⁽⁴⁾ことによって得られた成果であった。

しかし、この物質のみで世界を説明するというプログラムは、行き詰まりを見せることになった。問題は、熱をめぐる科学の中から出てきた。とりわけ決定的であったのは、熱素説——あるいはカロリック説ともいう——の崩壊である。

熱素説とは、熱の本性を特別の物質的実体であるとする説で、十八世紀後半から十九世紀前半に大きな影響力をもっていた。熱素とは、熱量の保存を担う実体で、通常の物質と結合して潜在化するか、あるいは離れて熱として現れ、温度上昇をもたらし移動する。熱素は、重さもなく、どのような過程においても保存される。相互反発するが、物質分子とは引力を及ぼし合う。また、分子のまわりに雰囲気 (atmosphere) として存在すると考えられていた。新しい燃焼理論を打ち立てたラヴォアジエは、この説の代表的論者の一人である。

熱素説に対する批判は、例えば、ラムフォード伯⁽⁵⁾の砲身旋削実験によってもたらされた。彼は、ミュンヘンにある軍の兵器工場の作業場で、大砲の穴を開ける仕事を指揮したときに、旋削によって大量の熱が発生することに気付いた。そして、この熱がどこから来るのかを問題として、四つの実験を行い、ロイヤル・ソサイティで報告した。第三番目の実験では、空気中からのカロリックの補給を絶つために、水中で旋削作業を行わせ、熱がいつまでも発生し続けることを示した。このような実験を踏まえた上で、「孤立した (insulated) 物体や、物体系から無制限に供給し続けることができるものが、物体的実体であるはずがない。これらの実験において熱が励起され伝達されたのと同じような仕方で励起され伝達され得るものについて明確な観念を持つとすれば、それが運動であると考えるべきであろう。それ以外の考え方は、まったく不可能ではないにせよ、きわめて困難であるように思われる」と記している。しかし、この熱運動説は、熱素説全盛の当時において、即座に受け入れられることにはならなかった。その理由は、定量的理解の手段を欠いていたからである。⁽⁶⁾

同じころ、ジュール⁽⁸⁾は電動機の効率を高める実験を行っており、電流が熱作用をもつことに注目し、水中のコイルに電流を流して上昇した水の温度と流れた電気の量を精密に測定した。その結果、発生熱量は電流の二乗と抵抗の積に比例するという、ジュールの法則が発見されたのである。一八四三年には、「磁電気の発熱作用につい

て、および熱の仕事当量について」という論文において、「一ポンドの水の温度を華氏目盛りで一度だけ上昇させることのできる熱量は、八三八ポンド「のおもり」を鉛直に一フィートの高さまで持ち上げることのできる機械的力（フォース）に等しいし、それだけの力（フォース）に転換されるだろう」と記している。この熱の仕事当量の値 J は、 $J = W/Q = 4.2 \text{ Joule/cal}$ (W は仕事、 Q は熱量)に相当している。ジュールの実験は、熱の物質理論の崩壊を準備した決定的実験であった。

このジュールの実験をもとに、ヘルムホルツは一八四七年に「力の恒存について」という論文を発表した。彼はここにおいて、固体および弾性体の運動、熱、電気、磁気、電磁気等の諸現象がすべて力学的な「活力」(Lebensdige Kraft)——これを $(1/2)mv^2$ と表現した——保存の原理の一般化として理解できることを理論的に証明した。そして更に、力学、化学、熱、光、電気、磁気などのすべてのエネルギー転換の法則を説いたのは、イギリスのランキンであり、これは一八五三年ことであった。

このようにして、世界を記述する基本概念として、物質に次いで、エネルギーが導入されたのである。

さて、情報が定量化されたときに利用されたエントロピーが発見されたのも、熱の研究においてであった。多くの場合、様々なエネルギーの相互転換は一方方向のみ生じ、エネルギーは散逸する一般的傾向を持っていると論じたのは、イギリスの物理学者、後にケルヴィン卿と呼ばれることになったウィリアム・トムソンである。彼は、「力学的エネルギーの散逸に向かう自然の傾向について」と題する論文において、エネルギーには、「高級」なものと、「低級」なものがあることを明らかにした。力学的エネルギーや電氣的エネルギーは最も高級なエネルギーであり、これらは他の形のエネルギーに変換することができる。これに対して、熱は最も低級なエネルギーである。低級という理由は、手間ひまかけてようやくその一部を仕事に変えることができるという、非常に扱

にくいエネルギーだからである。

この、トムソンの議論に

$$\int (dQ/T) \geq 0$$

という数学的表現を与え、

$$dQ/T \quad (Q \text{ は熱量, } T \text{ は温度})$$

をエントロピーと呼んだのは、クラウジウスである。

一八七七年に、ボルツマンは、熱力学の第二法則——エントロピー増大の法則——を力学的に説明しようと苦心し、エントロピーを確率論的立場から

$$S = k \log W \quad (S \text{ はエントロピー, } k \text{ はボルツマン定数, } W \text{ は微視的状态数})$$

と定式化したのである。

情報という概念の核にある「秩序を与える」あるいは「形を与える」という特質が、無秩序をもたらすエントロピーを手掛かりとして探究されていくことになる。このような議論の最初の布石として注目されるのは、何と云ってもJ・C・マックスウェルが『熱の理論』の中で行ったデモンの議論——マックスウェルのデモン (Maxwell's demon) と呼ばれる——である。トムソンをはじめ、シュレーディンガーやアインシュタインもこの問題と取り組んだが、定量的解析によってマックスウェルの疑問に答えたのは、シラードであった。そしてこのシラードの論文においてはじめて、情報という概念が物理学に導入されたのである。シラードは、一つの箱の中に気体分子が一個だけ入っている状況を想定した。この箱に仕切りを入れて、分子が右に居るか左に居るかを知ら

$k \ln 2$ (k はボルツマン定数、 \ln は自然対数)であることを示した。⁽²³⁾

その後、フランスの物理学者アリアルアンは、デモンの測定過程をネゲントロピー——シュレーディンガーがはじめて導入した概念で負のエントロピーともいう——を用いて、「ネゲントロピー↓情報↓ネゲントロピー」のサイクルとして、とらえようとした。⁽²⁴⁾

情報という概念が広く注目を集めるようになったのは、シラードの論文によってではなく、通信工学の分野で発表されたシャノンやウィナーの論文を通してであったことは、すでに述べた。

次に、通信工学の発展に不可欠であった、数学・論理学の発展をみていくことにしよう。

(二) 情報と数学・論理学

十九世紀の終わりから二十世紀のはじめにかけて、論理学の代数的取り扱いを行ったイギリスのブール⁽²⁵⁾、現代記号論理学と分析哲学の祖とされるドイツのフレイゲ⁽²⁷⁾、公理的方法の推進者として知られる数学者・論理学者であるイタリアのペアノ⁽²⁹⁾、プラグマティズムの創始者であり記号論の創始者の一人でもあるアメリカのパーズ⁽³⁰⁾、そして最終的には、哲学者論理学者であるイギリスのラッセル⁽³¹⁾と数学者・科学哲学者・形而上学者であるイギリスのホワイトヘッド⁽³²⁾にいたる思想家が、論理学において大きな革新を達成した。

ホワイトヘッドとラッセルは、「プリンキピア・マテマティカ⁽³³⁾」において、「論理を数学的に形式化する」だけでなく、「数学は論理学に還元可能である」——つまり、論理的なもののみから算術の概念、定理を定義、演繹することができる——というフレイゲの洞察に基礎を与え、論理学の根本法則から数学の全分野を導こうとし、実

際大筋において成功を取めた。

一九三六年、イギリスの数学者チューリング⁽³⁴⁾は、「万能計算機」のアイデアを展開し、二進法で書くことのできるプログラムであれば、どのようなものでも実行し得ることを証明した。この考え方はフォン・ノイマンら⁽³⁵⁾に受け継がれ、現在、コンピュータにおいて実現されている。

このようにして、人間の思考における根本的な論理過程が数学的に形式化され、これによってコンピュータに人間の思考を持ち込むことが可能となり、人間の脳において行われている情報処理が、機械によって代替し得ることが示されたのである。

更に論理に関する最近の話題を一つ付加するなら、それは、「ファジィ」論理の定式化とコンピュータへの応用である。⁽³⁶⁾これにより、二値論理には還元できない人間の思考の一部をもコンピュータに持ち込むことができるようになった。

(三) 情報と工学

① 電気通信工学の発達

十九世紀の後半になって、電信とか電話、無線通信といった電気通信技術がはつきりとした成果を挙げはじめた。ベルがベル電話公社を設立したのは一八七七年であり、マルコーニ⁽³⁸⁾が無線電信に成功しワイヤレス・テレグラフ・アンド・シグナル社を設立したのは一八九七年である。

情報という概念をはじめて定量的概念として自然科学に導入したのは、ハートレーであることはすでに述べた。彼は、情報を与えられたリストの中から記号や単語を連続的に選択することと定義した。S個のアルファベツ

トの中からN個を取り出して作られたメッセージは、組み合わせにおいて

2^N

の可能性がある。ハートリーは、情報量を

$H = N \log_2 S$

と定義した。

シャノンは、ブール代数における論理原則が、電気回路のオンとオフを記述するのに利用できることを見抜き、マサチューセッツ工科大学の修士論文において、電気回路で思考の基本的操作を行うことができることを示した。これに引き続き、シャノンはウィーヴァー⁽⁴⁰⁾と協力して、情報理論——正確には通信理論といわれるべきものである——の鍵となる考え方を開発した。

シャノンは、情報を、個々の内容や題材から全く離れて、単に二つの同じように生起し得る選択肢のいずれかを選ぶこと、ととらえた。二つの同じように生起し得る選択肢から一つのメッセージを選ぶのに要する情報量は、 $\log_2 2 = 1$ ビット (bit; binary digit) である。

シャノンの情報量の定式化は、後に取り上げることとして、ここでは彼が手掛けた情報理論の概観を示しておく。①情報通信系のモデルを設定し、ここに、情報源——情報源符号化——通信路符号化——通信路——通信路符号化——情報源符号化——受信者の経路を明らかにし、通信経路に介入する雑音源を導入した。通信路の内部を分析すると、変調——伝送路——復調からなる。②情報源を確率過程としてモデル化した。③エントロピー関数を規定し、これによって情報量 (amount of information) を定義し、情報を定量的に把握する尺度を与えた。④情報源符号化、通信路符号化、通信路容量について、基本的定理を与えた。これらにより、⑤伝達速度を落とす事なく

信頼性の高い情報伝達が可能であることを示した。⑥連続情報源に忠実度評価基準を与えるとき、最小限必要とされる情報伝送速度について考察し、データ圧縮の基礎理論を与えた。⁽⁴¹⁾ 以上の内容は、一九四八年に発表された「コミュニケーションの数学的理論⁽⁴²⁾」と題する論文に詳しく展開されている。

② 情報とサイバネティクス

ノーバート・ウィーナー⁽⁴³⁾は、幼少の頃から言語学者であった父の厳しい教育を受け、神童ぶりを発揮し、九歳でハイスクールに入学、十四歳でハーヴァード大学の大学院に入学、十八歳で学位を受け、二十五歳でマサチューセッツ工科大学に就職し、サイバネティクスという学問領域を開拓した。

サイバネティクスという語は、「舵手」を意味するギリシア語のキュベルネテス (κυβερνήτης) から作られたものである。そして、その定義は、ウィーナーの著書「サイバネティクス——動物と機械における制御と通信⁽⁴⁴⁾」の副題が適切に表現していることと、動物と機械における制御と通信に関する理論である。

サイバネティクスは情報概念を科学の領域に導入する上で、大きな役割をはたした。そこで、サイバネティクスの歴史的發展を多少詳しく振り返っておくことは、無駄ではないと考える。なぜならこのことを通して、情報のもつ「秩序を与える」とか「形を与える」という働きがどのような状況のもとで問題にされたのかを、知ることができるからである。

ウィーナーは、一九三〇年代から、メキシコの神経生理学者でありキャノンの協同研究者であったローゼンブリュート⁽⁴⁵⁾と共に研究を行っていた。彼らは、「科学の最も稔り豊かな領域というのは、確立された諸分野のあいだの無人地帯として見捨てられた領域である⁽⁴⁷⁾」との確信を共有していた。そのような領域の一つとして、純粋数学、

統計学、電気工学、神経生理学等が手掛けている研究領域があった。彼らは、「独立した科学者が、これらの科学の未開拓領域の一つにおいて、共同研究をおこなう機関」を組織した。

また、ウィーナーは、ブッシュの「アナログ型の微分解析機の研究計画に密接な関係をもっていた。この微分解析機は、一九三〇年から一九四〇年にかけての十年間、科学者が入手できたものの中では最良の計算機であった。重さは百トン、二千個の真空管、数千の継電機(リレー)、二百五十個のモーター、それに約二百マイルの電線を使った電気機械式計算機であり、計算ミスの確率は二万五千分の一であった。戦時体制化における弾道計算を行う必要性から、この計算機に改良が加えられていたのである。この研究を通して、ウィーナーは、デジタル方式電子管の利用、二進法、計算機による論理判断、メモリーの内蔵などを取り入れた計算機の構想を作り上げていた。この構想を覚書きとして残しておいたことから、後の研究者に影響を与えたことになった。ウィーナーは、「私の覚書きが、このような考え方を技術者の間に広める上で、何らかの役に立ったのなら、それでよかったと私は思っている」と書いているが、これはコンピュータのその後の発展を先取りした構想であった。

ウィーナーは、飛行進路曲線の予測理論とその理論を実地に応用する火器制御装置の協同研究という戦時研究に参加することになった。人間の照準手が、火器制御装置を操作するということから、「照準手を、彼らが操作する機械の中に数学的に組み込むためには、人間の(動作)特性を知ることが重要である」ということで、随意運動の研究が行われ、そこにおけるフィードバックの重要性が理解されてくるのである。この段階での研究成果は、「行動、目標、および目的論」という論文にまとめられた。古典力学では、運動はすべて厳密な因果律——位置と時間の変化で表される——に還元されるが、サイバネティクスでは目標探究の概念が中心をなしている。

ウィーナーらは、制御工学と通信工学の問題がたがい切り離せないこと、また、それらの中心にあるのはメッセージ(message)——時間的に分布した測定可能な事象の離散的あるいは連続的な系列——という概念に関するものであることを洞察した。彼らは、このメッセージから、時系列の統計的性質を知り、変分法の計算手法を利用し、最適値を予測するという解決法を見いだした。このようにして、通信工学の問題に統計力学の考え方を適用することによって、統計的な科学が構築されることになったのである。

ここにおいて、「情報量」に関する統計的な理論の展開が必要となった。ウィーナーは、「情報量の単位とは、同等に確からしい二つの選択肢のうちの一つを一回選択するときに伝えられる量」と定式化した。これは、統計力学におけるエントロピーの概念と結び付いている。イギリスの統計学者フィッシャーとベル電話研究所のシャノンも、ほぼ同時にこのような定式化を行った。ウィーナーは情報の重要性について、「情報は情報であって、物質でもなければエネルギーでもない」と述べ、「物質+エネルギー」ではとらえきれない自然の側面が存在することを洞察していた。

一九四二年には、ウィーナーらの協同研究を、ローゼンブリュートがニューヨークで開催された神経系における中枢性制止問題の会合で発表した。この会合で、大脳皮質の組織の研究に関心をもっていたイリノイ大学のマツカロックとの出会いが成立している。そしてその翌年には、マツカロック・ピッツのモデルとして有名な形式ニューロンのモデル——これは、認識を神経細胞による論理演算として純粋に物理学の視点からモデル化したものである——に名を連ねているピッツが、論理数学の分野からサイバネティクスの研究に参加した。

この頃には、ウィーナーとローゼンブリュートを中心とする科学者集団は、「通信、制御、そして統計力学を中心とする問題の本質的一体性——機械であろうと、生体組織内のことであろうと——に気付いていた」。彼らが、この研究領域をサイバネティクスと命名するに至るのは、一九四七年夏のことである。

ウィーナーはこの間に、超高速計算機が神経系のモデルになること、神経発火から二進法、動物における記憶から計算機のメモリーといった着想を得ていた。

戦時体制下において、ウィーナーの勧告書に近い路線で、計算機の建造が行われ、研究者の交流も頻繁となった。その結果、一九四三年から一九四四年にかけての冬、プリンストンにおいて、フォン・ノイマンとウィーナーの呼びかけにより、今日サイバネティックスと呼ばれる領域に関心をもつ研究者をすべて集めた会合が開催された。ここに集まった人達は、生理学者、計算機設計者、数学者などであった。この会議を通じて、異なる専門領域間における共通な考え方、概念、語彙の必要性が確認された。

一九四六年にはニューヨークで、一九四四年のプリンストンの会合に参加した人々を核として、フィードバックの問題に関する会合が開かれた。この会合には、技術者、数学者、神経解剖学者、神経生理学者だけでなく、更に枠を広げて、心理学者ではクリューヴァー、レーヴィン、エリクソン、経済学者ではモルゲンステルン、人類学者ではベイトソンとマーガレット・ミードが、加わった⁽⁶⁾。この会合は、その後、半年ごとに開かれることになった。

ウィーナーはこの間、メキシコ国立心臓医学研究所のローゼンブリュートとの協同研究を継続している。

一九四七年には、イギリスおよびフランスに出かけ、海外の研究者たちとの交流を深めた。イギリスでは、テイントンの国立物理学研究所でチューリングと会い、サイバネティックスの根本思想について語り合っている。また、ホルティンやバナルらとの会合から、彼らがサイバネティックスを科学および科学哲学における最も緊急な問題であると考えていることを知ったのである⁽⁶⁾。

フランスでは、ナンシーで開催された調和解析の会合に参加し、サイバネティックスと同じ立場から、統計的

概念と通信工学的概念を結合しようとしていた研究者との出会いを得ている。この会合を通して、社会組織における通信の概念と技術の重要性が認識されることになった。

そして一九四八年には、ノーバート・ウィーナー著『サイバネティックス——動物と機械における制御と通信——』が出版された。

(四) 情報と生理学・心理学

サイバネティクス建設において、神経生理学者ローゼンブリュートが大きく貢献したことからも明らかのように、「秩序を与える」とか「形を与える」という情報概念の導入には、生理学的研究も深く関係していたのである。

そのような意味において注目されるのが、十九世紀最後の体系的・総合的生理学者といわれるヨハネス・ミュラーである。彼は、ベルリン大学正教授、そして二度にわたりベルリン大学総長をつとめ、門下からは、細胞説を確立したシュヴァン、生理学の数学化をおし進めたデュ・ボア・レイモン、物理学・化学を基礎とした機械論的生理学を唱導したヘルムホルツ、生理学者ブリュッケ、社会医学・公衆衛生学・病理学・人類学に貢献した医学者ウィルヒョウらを輩出した⁽⁶⁾。

ミュラーの視覚生理学の業績の中で、特に有名なのは、「感覚神経の特異性能理論」である。感覚器官が、その受ける刺激の種類——機械的、電氣的、熱的、その他——のいかにかわらず、それぞれ特異的な感覚を得ることを主張している。つまり、物理刺激の特性によってではなく、その刺激が遭遇する道筋のいかにによって、様々な異なった感覚を与えるということである。そして、彼は、そのような性能の所在を神経に求めた⁽⁶⁾。

反応の仕方には、多様な刺激に対し単一な反応を示すものもあり、また、同一な刺激に対して多様な反応を示すものもある。現代の用語で言うなら、人体のメカニズムの中で、外から入ってくるインプットをどのように処理するかということである。このように、ミュラーの研究は人体の情報処理メカニズムに注目した最初の例である。⁽⁶⁵⁾

次に注目すべき人物は、パヴロフ⁽⁶⁶⁾である。彼の「条件反射」の研究は、情報概念の解明に大きな示唆を与えた。パヴロフは、実験室のイヌが食物を見ただけで消化液の分泌を起こすことを観察し、深く考えた。彼は、綿密な配慮の下に、食物をイヌの口に入れてやる前に、ベル、メトロノームのような一定の音をきかせる操作を繰り返すと、その経験を重ねたイヌはやがて食物を与えることなしに、その音だけで、唾液の漏出を起こすことを観察した。彼は、この唾液の分泌現象を、一種の特別な種類の反射作用と考え、条件反射 (conditional reflex) と命名した。条件反射というのは、無条件反射 (unconditional reflex) —— 逃避反射など種属に共通な生得のもの—— に対して、個体が、ある一定の条件の下に獲得する原理的には一時的な生理的現象である。⁽⁶⁷⁾

条件反射においては、例えばベルの音 (条件刺激) は、直接的な (無条件) 刺激 (肉片など) と同様の働きをもつということを示したのであった。つまりイヌにあっても、肉片の代わりをする記号の存在が認められるということになるのである。人間の場合は、こうした記号 (直接的刺激もしくはその実体の代替物) が極めて高度に支配しているが、一般に、大脳は、そのような記号行動機能を持つていて、パヴロフは、このような行動を「信号活動」と呼んだ。⁽⁶⁸⁾

これは人間ないし生物体に対するインプットが、いかに生体内で処理されるかということに関する、画期的な研究であった。⁽⁶⁹⁾ それと同時に、人間ないし生物体の振舞いを支配するものとして、物質、エネルギー以外の何もか——つまり情報——の存在を指摘する重要な契機となったのである。⁽⁷⁰⁾

ワトソン⁽⁷¹⁾はパヴロフの影響を受けた心理学者であり、行動主義心理学の開祖である——しかし、生理学の立場に立つパヴロフは、ワトソンの学説には強く反撥した。行動主義心理学は、S-R心理学とも呼ばれる。Sはstimulus (刺激) の頭文字であり、Rはresponse (反応) の頭文字である。

心理学は本来心を探求する学問であるが、実際に心を調べようとすると、どうやって一般的客観的に心を調べたらよいかかわからない。これは大変な難問である。そこで心というものを一般的に科学の対象として扱おうとしたときに、心そのものを扱っていたのでは学問にならないという考え方が生まれてくる。そこで、ある個人に刺激を与えると、反応が現れることに着目し、この刺激と反応の間の関係を心と理解しようとしたのである。つまり、心のところをブラック・ボックスとしておいて問題を処理しようとしたのである。ある刺激に対してある反応をするという、刺激と反応の間にある変換因子としての人間像が描かれたことになる。これは、情報処理機構として人間をとらえていく考え方に非常に近いものである。⁽⁷²⁾

ミュラー、パヴロフ、ワトソンの視点は、人間に対するインプットとアウトプットの間を論ずるものであった。

他方、生体の内部における情報処理の仕方に注目する観点が存在していた。この点において、まずはじめに注目しなくてはならないのが、クロード・ベルナル⁽⁷³⁾である。医学者ベルナルの活動の最盛期は、ミュラーの弟子たちが活躍した時代と重なる。彼は終始医学者であったが、しかし診察には従事することなく、実験的研究に専念する新しいタイプの学者であった。彼は、生理学と化学を融合した。

彼の有名な内部環境 (le milieu intérieur) の考え方というのは、はじめ、「生体が全体として外部にはりめぐ

らされた環境の中で生きてるように、生体を構成する細胞たちは血液、体液をその「内部環境」にもっている。そこには食物の消化によって用意されたものや、・・・「内分泌」によってそこに注ぎ込まれたものが、一定の温度、酸素分圧を保って組織ないし細胞の生存に過不足のない環境条件をかたちづけているものとされる」という形で示されたが、その力点は次第に、「よく調節(レギュレート)された恒常状態の保持」という面に移っていた。⁽⁷⁴⁾

ベルナールは、「外界の変化にかかわらず、内部環境において一定の状態を保持するという目的をもって機能するものを生物体という」と定義した。つまり、外界に変化があっても、自分の内部の全体的状況をできるだけ変わらないように維持しようとするコントロール・メカニズムをもったものを生物と呼ぶということである。⁽⁷⁵⁾

ベルナールの考え方は、キャノンのホメオスタシス(homeostasis 恒常性)、更にはセリエのストレス学説へと受け継がれていくことになる。

この内部環境、ホメオスタシス、ストレス説の考え方は、入ってきた情報に対して、その情報を処理しながら、全体としては常にその情報があたかもなかったかのごとくに処理する、いわば様々なインプットがあるにもかかわらず、アウトプットとしては何も出てこないような形で制御するというメカニズムが存在するということである。これは、システムのメインテナンスの問題に係しているのである。⁽⁷⁷⁾

(四) 情報と生物学

「秩序を与える」、あるいは、「形を与える」という現象は、生物においてはごくありふれた現象である。この生物の研究によって、はじめて、情報が実体をもったものとして認められることとなったのである。

一九五三年にワトソンとクリック⁽⁷⁸⁾は、DNAの二重螺旋構造と同時に情報の伝達される仕組みまで明らかにした。この発見は、生物を単なる「物質+エネルギー」系とみなすそれまでの考え方を改め、生物は「物質+エネルギー+情報」系であるとの見方を確立することとなった。

それ以前には、遺伝は遺伝子という物質が伝達されるものと解されていた。もちろんDNAという物質が伝達されるのであるが、そこにおける遺伝の担い手は、二重螺旋構造をもつ分子配列のパターンであることが明らかにされたことが、重要なのである。

アリストテレスの質料と形相との関連で述べるなら、質料は、「物質+エネルギー」という形で、科学的カテゴリーとして確立されてきたが、形相は、情報という概念が登場するまでは、科学的カテゴリーとして取り上げる術がなかった。この形相が明確に科学のカテゴリーとして確立される契機となったのは、この遺伝情報の解明であった。これが、「初めて唯物論に偏向しない科学的世界像が登場した⁽⁸⁰⁾」といわれる所以である。

〈注〉

(1) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」、『東京大学公開講座39、情報化と社会』、東京大学出版会、一九八四年

において示された知見に示唆を得た。

(3) Antoine Laurent Lavoisier, 1743-94, ラヴォアジエによる元素の定義は、次のようである。

(2) Sir Isaac Newton, 1642-1727. ニュートンは、力学において物体を特徴づけるものは、広がりよりも質量であるとして、大きさや形状を捨象し、一点に全質量が集ま

る。それらは解決が必要とされている不確定の問題である。それらは解決が必要とされている不確定の問題である。

- り、それに対しては無数の解答が可能であるが、そのいずれをとっても自然に適合するとはとても思えない。したがって元素という名において、物体を構成する単純で分割できない粒子 (molecules) を意味させようとするならば、恐らく私たちはそれらについて何もわからないだろう。反対に、物体についての元素 (element) あるいは原質 (principle) の名を、分析によって到達し得る最終のもの の観念に対して使うならば、いかなる手段によってもいまだ分解できないあらゆる物質が、私たちにとっては元素である。そういうことで満足することにしよう。
- これは私たちが単純であると思えず物体がそれ自身二つあるいはそれ以上の原質の化合物ではないと確言できるということではなくて、それらの原質が分離不可能であるゆえに、あるいはむしろ私たちがそれらを分離するにかなる手段ももっていないがゆえに、それらは私たちにとって単純な物体のように振る舞うのであり、私たちは実験と観察が証明を与えるまではそれらが化合物であると仮定すべきではないのである。」(柴田和子訳『ラウフワシエ化学原論』、坂本賢三編集、科学の名著 第II期 4 ラウフワシエ』、朝日出版社、一九八八年、七頁。)
- (4) 村上陽一郎「物質・生命・人間」、『新岩波講座哲学6 物質・生命・人間』、岩波書店、一九八六年、一〇頁。
- (5) Count Benjamin Thompson Rumford, 1753-1814.
 (6) "An Experimental Inquiry concerning the Source of the Heat which is excited by Friction," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 88 (1798), pp. 80-102. 引用文は、佐野正博訳「摩擦による引き起される熱の源についての実験的研究」村上陽一郎編集「科学の名著 第II期」近代熱学論集』朝日出版社、一九六三年、一一七頁による。
- (7) 坂本賢三著「物理科学史」、放送大学教育振興会、一九八九年、九二―四頁。
- (8) James Prescott Joule, 1818-89.
 (9) "On the Caloric Effects of Magneto-electricity, and on the Mechanical Value of Heat," *The Scientific Papers of James Prescott Joule*, Vol. 1, pp. 123-159. 初出は *Phil. Mag.*, Ser. 3, Vol. xxiii(1833)による。杉山滋郎氏の日本語訳が、村上陽一郎編集「科学の名著 第II期 3 近代熱学論集」、三三―一六七頁にある。
- (10) 前掲書、二六四頁。
- (11) Hermann Ferdinand von Helmholtz, 1824-94.
 (12) "Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung."
 (13) 川喜田愛郎著「近代医学の史的基盤」(下)、岩波書店

一九七七年、六五六頁。

- (14) William John Macquorn Rankine, 1820-72.
 (15) Sir William Thomson, 1824-1907. Lord Kelvin.
 (16) "On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy."
 (17) 小出昭一郎・安孫子誠也著「エントロピーとは何だろうか」、岩波書店、一九八五年、二二―三頁。
- (18) Rudolf Clausius, 1822-88.
 (19) Ludwig Boltzmann, 1844-1906. ホルツマンの伝記とエッセイ、Engelbert Broda, *Ludwig Boltzmann: Mensch, Physiker, Philosoph*, Franz Deuticke, Wien, 1955. 市井三郎・恒藤敏彦訳「ホルツマン——人間・物理学者・哲学者——」、みすず書房、一九五七年初版、一九八八年新装第三刷、が参考になる。
- (20) James Clerk Maxwell, 1831-79.
 (21) *Theory of Heat*(1870) H. マックスウェルが書いた教科書である。
- (22) 容器に気体を入れ、仕切りをつくり、それに小さな扉をつける。そこに番人を置いて、気体分子の中で、速度が速く運動エネルギーの大きい分子だけを一方方向にのみ通すことにする。このようにすると壁の両側で温度差を生じさせることができる。つまり、分子の選別を行
- エントロピーを減少させることができるのである。実際には、このようにしたものの番人の働きが実現できるか分からないが、マックスウェルは彼の速度分布則を議論したとき「このような超人間的な眼を持つ生物を仮想して思考実験的に議論した。それ故、彼の名を冠して、マックスウェルのデモンと呼ばれるのである。」(岩波理化学辞典』(第四版) 岩波書店、一九八九年と、『物理学辞典』、培風館、一九八四年、参照。)
- (23) マックスウェルのデモンおよびシラードの議論に関する現代的解説は、湯川秀樹編集「岩波講座 現代物理学の基礎」[第二版] 8 生命の物理』、岩波書店、一九七八年、一五〇頁以降に詳しい。
- (24) Léon Brillouin, 1889-1969. この議論は、彼の著書 *Science and Information Theory*, Academic Press Inc., New York, 1956, 1962. 佐藤洋訳「科学と情報理論」みすず書房、一九六九年、に詳しい。
- (25) 対象を文字によって表現し、それらの間の関係を一定の演算法を決めて研究するやりかたをいう。
- (26) George Bool, 1815-64.
 (27) 分析哲学の主張とは次のようである。哲学とは世界を説明することではなく、世界をより明晰に把握することであると、それはとりもなおさず世界記述、世界描写

の内容の意味をより明確に理解することである。そのためには、それらの記述や描写の言葉の意味を「分析」しなければならぬ。このような哲学観から、言語が主要な関心事となること、また理解困難な「深遠な」形而上学への反感、したがって経験主義への傾斜がでてくることは明らかであろう。また、言語分析の一つの手法として、時期を同じくして急速な展開をみせつつあった記号論理学の利用もまた自然なことであった。さらに、相互討論による集团的哲学作業という様式が自然に生じてきた。(大森莊蔵「分析哲学」『科学史技術史事典』、弘文堂、一九八三年、参照。)

- ②⑧ Friedrich Ludwig Gottlob Frege, 1848-1925.
- ②⑨ Giuseppe Peano, 1858-1932.
- ③⑩ Charles Sanders Peirce, 1839-1914.
- ③⑪ Bertrand Arthur William Russell, 1872-1970. 一九五〇年ノーベル文学賞を受賞。
- ③⑫ Alfred North Whitehead, 1861-1947.
- ③⑬ *Principia Mathematica*, Cambridge University Press, 1910-13. 岡本賢吾・戸田山和久・加地大介訳『プリンキピア・マテマティカ序論』、哲学書房、一九八八年。これは「プリンキピア・マテマティカ」の第一巻の「はじめに」と「第一版への序論」を翻訳したものである。

- (1896) ワイヤレス・テレグラフ・アンド・シグナル社を設立 (1897) して船舶との通信業を開始、イギリス海峽を挟んでフランスとの間 (51km) で無線通信に成功 (1899) 大西洋を隔てたニューファウンランドとイギリスのコーンウォールの間 (3000km) で無線通信に成功 (1901) した。(城阪俊吉「マルコーニ」『科学史技術史事典』参照。)
- ③⑮ Claude Elwood Shannon, 1916-.
- ④⑩ Warren Weaver.
- (1) 北川敏男「情報理論」『科学史技術史事典』四七八-七九頁。
- ④⑫ Claude E. Shannon and Warren Weaver, *A Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, 1964. 塚谷川淳・井上光洋訳『インフォメーション・エン지니어リングの数学的理論——情報理論の基礎——』、明治図書、一九六九年。
- ④⑬ Nobeit Wiener, 1894-1964.
- ④⑭ Nobeit Wiener, *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1948.
- ④⑮ Walter Bradford Cannon, 1871-1945.
- ④⑯ Arturo Rosenblueth, 1900- [没年未詳]

る。

- ③⑰ Alan Mathison Turing, 1912-54.
- ③⑱ John Ludwig von Neumann, 1903-57.
- ③⑲ 柳瀬陸男著『現代物理学と新しい世界像』、岩波書店、一九八四年、八一頁以降参照。また既に二の注(1)で言及した、中村雄二郎他著『フアジー——新しい知の展開』には、フアジーのもつ哲学的問題にまで踏み込んだ興味深い議論が、収録されている。

- ③⑳ Alexander Graham Bell, 1847-1922. ヘルは「父の影響もあって若いころから聾啞者教育に深い関心を抱いていた。鼓膜の研究から鉄の薄板を人工鼓膜とする発想をもつようになり、さらにこれが振動板を用いて音声を電流に変えて伝搬する方法に結びつき、多重通信の実験中に偶然音声が通信線を介して送られたことを知って、電磁式電話機を試作し、特許を出願 (1876) ヘル電話公社を設立 (1877) した。更にまた、聾啞者のための研究を行なうベルタ研究所を創設 (1880) し、科学雑誌 *Science* を発刊 (1883) するよう、事業を半掛けた。(城阪俊吉「ヘル」『科学史技術史事典』参照。)
- ③㉑ Guglielmo Marchese Marconi, 1874-1937. 一九九五一年、マルコーニはヘルツの電磁波の研究を知り、その実用化を試み無線通信装置を発明、イギリスで特許をとり

- ④⑰ Nobeit Wiener, *Cybernetics*, p. 2.
- ④⑱ *Ibid.*, p. 3.
- ④⑲ Vannever Bush, 1890-1974.
- ④⑳ Loel N. Shurkin, *Engines of the Mind*, Washington Square Press, 1984. 谷本一郎訳『コンピュータを創った天才たち——そのはるかから人工知能へ——』、草思社、一九八九年、九六頁。
- ④㉑ Nobeit Wiener, *Cybernetics*, p. 4.
- ④㉒ *Ibid.*, p. 6.
- ④㉓ A. Rosenblueth, N. Wiener, and J. Bigelow, "Behavior, purpose, and teleology," *Philosophy of Science*, 10, pp. 18-24, 1943.
- ④㉔ Nobeit Wiener, *Cybernetics*, p. 8.
- ④㉕ *Ibid.*, p. 10.
- ④㉖ Sir Ronald Aylmer Fisher, 1890-1962.
- ④㉗ *Ibid.*, p. 132. "Information is information, not matter or energy."
- ④㉘ Warren McCulloch, 1898-1969.
- ④㉙ Walter Pitts, 1920-60.
- ④㉚ Nobeit Wiener, *Cybernetics*, p. 11.
- ④㉛ H. Klüver.
- ④㉜ Kurt Lewin, 1890-1947.

M. Ericsson.

Oskar Morgenstern, 1902-77.

Gregory Bateson, 1904-80.

Margaret Mead, 1901-78.

(68) John Burdon Sanderson Haldane, 1892-1964.

John Desmond Bernal, 1901-71.

(69) Johannes Petrus Müller, 1801-58.

Theodor Schwann, 1810-82.

Ernst Heinrich du Bois-Reymond, 1818-96.

Ernst Wilhelm Bricke, 1819-92.

Rudolf Ludwig Virchow, 1821-1902.

(64) 川喜田愛郎, 前掲書, 六八〇頁以降参照。

(65) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」, 前掲書, 二一七頁。

(66) Ivan Petrovitch Pavlov, 1849-1936.

(67) 川喜田愛郎, 前掲書, 一〇六八頁以降参照。

(68) 村上陽一郎「物質・生命・人間」, 前掲書, 六頁。

(69) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」, 前掲書, 二一八頁。

(70) 村上陽一郎「物質・生命・人間」, 前掲書, 六頁。

(71) John Broadus Watson, 1878-1958.

(72) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」, 前掲書, 二二二頁。

〇一一頁。

(73) Claude Bernard, 1813-78.

(74) 川喜田愛郎, 前掲書, 七八二頁。

(75) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」, 前掲書, 二一八頁。

(76) Hans Selye, 1907-82. ストラス学説 (1936) とは、寒

さ・外傷・毒物など外界からの不都合な刺激 (ストレッ

サ) が多様であっても、生体の反応は一定の脳下垂体

前葉-副腎系のホルモン分泌でそれに対応するという説。

(『岩波 生物学辞典』第三版 参照。)

(77) 村上陽一郎「歴史における情報の役割」, 前掲書, 二一九頁。

(78) James Dewey Watson, 1926-. 一九六二年にノーベ

ル生理学賞を受賞。

(79) Francis Harry Compton Crick, 1916-. 一九六二年に

ノーベル生理学賞を受賞。

(80) 吉田民人「情報・資源・自己組織性」, 『創造する組織

の研究』, 講談社, 一九八九年, 二六一頁。

四、情報の二つの定式化

(一) 通信工学における情報の定式化

① 情報量を考えるための例

具体例を扱いながら、通信工学における情報量の定式化の方法をたどってみたい。

昔、二十の扉というクイズ番組があったが、これは、解答者の二十回の質問にたいし出題者は「イエス」か「ノー」だけを答え、最後に解答者が答えを言い当てるといふものであった。この場合、一回の質問に対してイエスカノーの二つの可能性がある。それ故、二十回の質問に対しては、 $2 \times 2 \times \dots \times 2$ と二十回掛け合わせた 2^{20} 個の可能性があることになる。質問を繰り返して解答を出すときには、 2^{20} 個の可能性の中から一つを選んでくるといふことになる。ここで、二十回の質問を、前後十回づつに分けたとしよう。当然のことであるが、十回の質問よりも二十回の質問を繰り返した方が多くの情報が得られるであろう。また、十回質問してその後また十回質問すれば、そのとき得る情報の量は、二十回の質問をして得る情報の量と同じはずである。そこで、もし、二十回の質問で得られる情報の量を 2^{20} としてみるとどのようなことになるであろうか。これは十回の質問を二回繰り返したときの情報の量と同じになっていなくてはならない。ところが、十回の質問で得られる情報の量は 2^{10} であるから、それを二回繰り返すときには 2×2^{10} ということになり、

$$2^{20} \neq 2 \times 2^{10}$$

情報と現代科学
である。この性質は満たされることが分かる。実際にこのような性質を満たす量としては、可能性の数の対数をとればよい。すると、

$$\ln 2^{20} = 2 \ln 2^{10}$$

となって成立する。

もう一つ別の具体例を考えてみよう。五十二枚のトランプ・カードの中から、ハートのエースを指定する場合を考えてみよう。一番簡単な方法は、五十二枚のカードの中から、直接ハートのエースを指定する方法である。この場合、得られる情報の量は、

$$\ln 52$$

である。また別の指定の仕方としては、まず、ハート、クロバー、ダイヤ、スペードの四種類の中からハートを指定し、次に、ハートの十三枚の中からエースを指定するという方法もある。この場合、得られる情報の量はそれぞれ

$$\ln 4 \text{ と } \ln 13$$

である。これらの情報の量を合成したものは、最初の場合の情報の量と同じはずである。実際、

$$\ln 52 = \ln 4 + \ln 13$$

となって、一致することがわかる。

② 情報量の定式化

以上の例を通して明らかになったように、ある特定の事象が生じたとき、それを知ることによって得られた情報量は、可能な事からの総数を W とするとき

$$I = K \ln W \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 K は定数である。情報量の単位としては、ビットを用いることが多い。このときには定数を、

$$K = \log_2 e \quad (2)$$

と選んで、情報量を

$$I = \log_2 W \text{ (ビット)}$$

と表現する。

いま W 個の可能な事があるが、それぞれ確率 p_1, p_2, \dots, p_n で実現するとしたとき、要素 i が起こったことを知ったときに得られる情報量は、

$$I_i = \log_2 (1/p_i) \quad (3)$$

であり、確率が等しく、 $p_i = 1/W$ であれば、 $I_i = \log_2 W (= I)$ となり、式(2)と同型になる。式(3)によれば、確率の非常に小さい要素、つまり起こりそうもない事が起こったときに得られる情報量が大きく、確率の大きな要素が起こったときに得られる情報量が小さいということになっており、我々の常識的な感覚とも矛盾しない定式化になっている。

また、平均情報量は、式(3)を用いて、

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (4)$$

と表すことができる。シャノンが通信の数学理論の基礎を建設したときに導入した情報量はこの形であった。

これまで、 W を起こりうる可能な事象の数と表現してきたが、事象というのはなんでもよく、たとえば実現可能な状態の数でもよい。そのようにすると、式(1)の情報量は定数因子を除いて、エントロピーに対するボルツマ

ンの式

$$S = k \ln W$$

(5)

(Sはエントロピー、kはボルツマン定数、Wは微視的状态数)とまったく同等な型をしている。

式(1)と式(5)は、形の上で類似している。このことが、情報とエントロピーの間に混乱をもたらすことになった。形式的には、Kとkが違っているというだけのことであるが、意味の上での相違は大きい。例えば、式(5)のエントロピーは系に付随した物理量であるが、式(1)の情報量は物理量でない。そのようなことから、安易にKをkで置き換えるようなことはできないのである。⁽¹⁾

③ 問題点の吟味

チェリーは、ハートリーの数学的定義(一七六頁参照)からでてきたものを情報と呼んだことは適切でなかったし、また、シャノンの情報の定義は情報概念のほんの一面にすぎなかったと、指摘している。⁽²⁾

そして更に概念上の混乱をもたらしたのは、シャノンがメッセージ中のシンボルの統計的振舞いを分析するに際して、エントロピー概念を比喻として用いたことである。情報はメッセージを作るとき「選択の自由を表す量」(amount of freedom of choice)と関係していた。それ故、シャノンとウィーヴァーは、高度に秩序化された状態は、「無秩序の度合あるいは選択可能性が大きい」ということで、これは情報(あるいはエントロピー)が少ない」と考えたのである。ウィーケンも、「シャノンの式はボルツマンの式と形式的には同型であるが、式が担う意味においては、ほとんど共通点はない」として、比喻としてエントロピーを持ち出すことは不適當だとしている。⁽³⁾

実際、シャノンとウィーヴァーのように考えると、奇妙なことになる。つまり、シンボルの並び方が無秩序であればあるほど——つまりエントロピーが高ければ高いほど——、情報容量(information content)が大きいということになるわけで、極端な場合は、エントロピーが最大の純粋なノイズに最大の情報が含まれているということになってしまう。シャノンもこのことには気付いていたのだが、意味論の問題は通信工学の問題とは無関係だとして、彼らの立場を正当化した。⁽⁴⁾

ストウニアによれば、シャノンらは、情報を、伝達されるものとして抽象的な定量化し得る実体(entity)ととらえたのだが、真の意味での情報理論を構築したわけではなかったという。⁽⁵⁾「シャノンがエントロピーを比喻として用いたことは、不幸であった。情報とエントロピーの間に、物理的な関係が存在することは確かである。しかし、それはシャノンが示したような直接的関係ではないし、また、ブリルアンが示したようにシャノンの情報に負の符号をつけたものでもない。」⁽⁶⁾

では、どのような形で情報とエントロピーを定式化すれば、両者の間の物理的な関係をとらえることができるのであろうか。

(二) 情報の物理的定式化

ストウニアは、情報を実在としてとらえている。彼が目指しているのは、情報物理学(information physics)の建設であり、更には、一般情報理論(general information theory)の建設である。

彼は出発点において公理を設定し、情報と組織性(organization)との関係を次のように規定した上で議論を開始している。⁽⁷⁾

1、組織化 (organize) された構造はすべて情報を含んでいる。

〈系〉、何らかの形態の情報を含まずに組織化された構造は存在し得ない。

2、一個のシステムに情報を供給すると、そのシステムはより組織化される、あるいは、再組織化される。

3、組織化されたシステムは、情報を放出あるいは伝達する能力をもつ。

組織性との関連において情報をとらえるというのは、情報の語源的意味——秩序を与える、あるいは、形を与える——に忠実な定式化である。

もし、エントロピーの増大が組織性の低下をもたらすとするならば、エントロピーと情報の適切な関係はどうなるであろうか。この問題を、シュレーディンガーとボルツマンの議論にさかのぼって考察する。⁽⁸⁾

シュレーディンガーはボルツマンの成果をもとに、エントロピーの統計的意味を考え、ボルツマンの式を次のように記した。

$$(\text{entropy}) = k \log D \quad (1)$$

ここでkはボルツマン定数である。Dは「問題としている物体の原子的な無秩序の程度を示す量」である。

そして更に、無秩序Dは、「一部分は熱運動の無秩序であり、一部分は、異なる種類の原子または分子が無秩序に混じりあっていることによるものである」ことを表している。つまり、(コップの中で)液体中に砂糖が拡散していくというのは、無秩序Dの増大を表している。同様に、熱を加えることにより、「熱運動の混乱が増大し」、それによって無秩序Dが増大する。シュレーディンガーは、結晶を溶かしたときのことを指摘して、「原子または分子のきちんとした永続的な配列が破壊されて、結晶格子から絶えず変化する無秩序な分布へと変わるからだ」と述べている。

シュレーディンガーの「生命とは何か⁽⁹⁾」の副題は、「物理的にみた生細胞」というものである。彼は、統計的概念を用いて、生命システムが低エントロピー・レベルに維持される傾向性を表現するにはどうしたらよいか、という問題を考察した。そして、生命体は「負のエントロピーを摂取している」と考えたのである。つまり、もしDが無秩序の目安であるとするなら、その逆数、 $1/D$ は、秩序を測定する直接的目安と考えられるだろうとした。このような考察を通して、ボルツマンの式を次のように書き換えた。

$$-(\text{entropy}) = k \log(1/D) \quad (2)$$

別の言い方をするなら、「エントロピーの符号をマイナスにすると、それは秩序の目安になる」としたのである。ここで、シュレーディンガーが置いた二つの仮定を確認しておこう。

第一は、無秩序Dは、ボルツマンがエントロピーSを、

$$S = k \log W \quad (3)$$

と表現したときの熱力学的確率関数Wに等しいということである。

$$W = D \quad (4)$$

第二は、秩序は無秩序の逆数、つまり、

$$O_r = 1/D \quad (5)$$

ということである。ここにおける O_r はシステムの組織性を表す。

ここでストウニアは、第三の仮定、つまり、情報は組織性の関数である、

$$I = f(O_r) \quad (6)$$

を導入する。そして更に、情報と組織性は、直接的かつ線形的な関係にあるとする。すると式(6)は、

$$I = c(Or) \quad (7)$$

と書ける。ここに c は定数である。あるいはまた、秩序を情報の関数と考えることもできる。

$$Or = I/c \quad (8)$$

式(5)を参照すると、式(8)は、

$$D = I/Or = c/I \quad (9)$$

となる。式(4)を考慮した上で、式(9)をボルツマン/シュレーディンガーの式(3)に代入すると、

$$S = k \log(c/I) \quad (10)$$

となる。 I に $1/c$ を代入して

$$I = ce^{-Sk} \quad (11)$$

となる。この式が、ストウニアが示した情報とエントロピーの基本的関係式である。

$S = 0$ のとき、つまり絶対零度の時の情報容量を I_0 とすると

$$c = I_0 \quad (12)$$

と定数を確定できる。ただし、 c は与えられたシステムの中では一定であるが、システムが異なればおのずと異なる値をとる。このように I_0 を決めると、式(10)は、

$$S = k \log(I_0/I) \quad (13)$$

となり、無秩序の定量的表現は、システムのエントロピーがゼロの時の情報容量 I_0 と、エントロピーが任意の値 S のときの情報容量 I の比として、表現されることになる。

ストウニアは、情報をこのように定式化することによって、シラード、ハートリー、シャノン、ウィーヴァ

ー、プリルアンらの定式化に伴う問題を克服し、情報を物理的実在として議論する道が開かれるとしている。実際、ここではエントロピーと情報の関係が物理定数 k で結び付けられており、アナロジーによって両者をつなげて考察する必要はなくなっている。

〈注〉

- (1) 湯川秀樹監修 『岩波講座 現代物理学の基礎』 [第一版] 8 『生命の物理』 岩波書店、一九七八年、一四一—四八頁に詳し。
- (2) Colin Cherry, *On Human Communication*, 3rd ed., The MIT Press, Cambridge Mass., 1978.
- (3) Jeffrey Wicken, "Entropy and Information: Suggestions for a Common Language," *Philos. Sci.* 54, pp. 176—193.
- (4) Tom Stonier, *Information and the Internal Structure of the Universe: An Exploration into Information Physics*, Springer-Verlag, London, 1990, p. 56.
- (5) *Ibid.*, p. 54.
- (6) *Ibid.*, p. 57.
- (7) *Ibid.*, pp. 25—6.
- (8) *Ibid.*, pp. 37—40.
- (9) Erwin Schrödinger, *What is Life?: The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, 1944. 岡小天・鎮目恭夫訳 『生命とは何か——物理的視点から細胞——』 岩波書店、一九五一年。

五、むすびにかえて——情報概念の導入の意義

近代科学がスタートした当初、できるだけ少ない基本概念をもって世界を記述するという方針から、最も基本的なものとして物質に焦点が絞られた。しかし、物質のみで世界を説明するというシナリオは書き換えざるを得なくなり、まずはじめにエネルギーが導入され、次いで情報が導入されるに至ったのである。このようにして「物質」↓「物質+エネルギー」↓「物質+エネルギー+情報」というように、世界を記述する基本概念が確定されてきた。

物質に次いでエネルギーが導入されたとき、熱の研究が媒介となったわけであるが、このときのエネルギーは非常に抽象的にとらえられていた。つまり、エネルギーとは、物体に供給すると熱を生ずるものであるとして、理解されていたのである。

情報も同様に抽象的にとらえられている。情報は、数学的に定量化しうる実体 (entity) との洞察から、メッセージを作成するときの選択の自由を表現する量として導入された。このように定式化された情報が、物理学のエントロピーと形式的に類似していることから、アナロジカルな議論が行われた。しかし、このようにして形式的に導入された情報——このときの情報は物理量ではない——と、物質あるいはエネルギーを関連させて議論するには、問題があると考えられてきた。

ストウニアは情報を物理的実在としてとらえる立場から議論をスタートし、その定義を根本的に改めるとともに、定式化に成功した。この場合、情報は、ちょうどエネルギーを物体に加えると熱を生ずるように、情報を物体に加えると構造（あるいは組織）を現出するという形で、とらえられている。これは、情報という非常に抽象

的な概念を見事にとらえたものであるとともに、その語源的意味にも忠実な定式化になっている。ここにおいてはじめて、「物質+エネルギー+情報」の「+情報」の意味もはっきりとし、世界を記述する基本的要素が三つ出揃ったことになる。

このことの意義は、非常に大きい。というのは、一方において、世界を記述するのに必要な基本概念がもう一つ新たに導入されたことにより、当面、従来の自然科学が対象外として扱わなかった問題、あるいは扱いきれなかった問題に、新たな光を当てることになるだろう。最も直接的関係をもっている問題は、心 (mind) の問題、それから、生成、進化、秩序形成、自己組織性といった問題である。また、他方において、情報は、価値や意味の問題とも関連していることから、従来からこれらの問題を論じてきた社会科学や人文科学と自然科学の連携が深まることになるだろう。細分化を重ねてきた諸科学は、情報という概念を核として、ゆるやかな統合をめざすことになるのではないだろうか。

〈注〉

- (1) Tom Stonier, *Information and the Internal Structure of the Universe: An Exploration into Information Physics*, p. 27.

*本稿執筆に際しては、草稿の段階で何度か口頭で報告する機会に恵まれた。その際、貴重なアドバイスを頂戴した方は、京都大学の下程勇吉名誉教授、早稲田大学の永安幸正教授、川村学園女子大学の小山高正講師、そしてモラロジー研究所の高巖研究員である。ここに記して感謝の意を表します。