

# 情報科学の歴史 (1)

## —情報科学の成立 1936-48

廣野 喜幸

### 序

請求書の書類をパーソナル・コンピュータで作成する。メールで会議の日時場所を確認する。行き先までの経路や運賃をソフトで調べる。スマホでチャットやゲームに興じる。等々、情報網や情報科学技術/情報テクノロジー/IT(Information Technology)なしの生活を私たちはもう考えることはできないだろう。

最近、広辞苑の最新版(第7版)が刊行された。情報に関連した項目は26に及んでいる。第2版(1969年)では、情報のほか、情報局と情報理論の2つしかなかった。隔世の感を思わざるをえない。辞典の項目数のこの変化は、この半世紀で社会の情報化が格段に進んだことを反映している。

注目すべきは、ITは私たちのありようを根本のところまで規定しつつある点である。情報化は水道網等々と同じく、私たちの社会のインフラとして広く深く浸透しており、フィルターバブル(パリサー 2016)や集団分極化(サンスティーン 2003)など、民主主義といった社会の根幹をも(望ましくない形で)変えてしまいかねない。根本化されてしまった体制の変容は、私たちに甚大な影響を与える。情報化のこのうねりは、私たちをどこに連れて行こうとしているのだろうか。

ビッグデータ問題はこれまでのプライバシーの考え方を抜本的に変えてしまうかもしれない、技術的特異点問題は、論者によれば人工知能による人間の支配や人類全体の抹殺という、SF的な、しかし、惑星衝突による文明の滅亡といった問題と同様な、「そんなもの来っこない」などと一笑に付して済ますには、いささか不気味な契機を孕んでいるようにも思われる。制度としてのテクノロジー・アセスメントは衰退してしまっただが、私たちは現在のITのアセスメントに真剣に取り組むべき時期を迎えているのだろう。

ITの展望には、その一部として、来し方を把握した上で、行く末を見極める作業が確実に含まれているだろう。また、近年、社会に対する科学の影響を研究する科学技術社会論(STS, Science and Technology StudiesもしくはScience, Technology and Society)がさかんになってきたが、ITや情報科学が社会に対してどのような影響を及ぼすかは、科学技術社会論の最重要な課題の一つのはずである。したがって、情報科学の通史的概観を得、その帰趨を見定め、将来の展望を切り開くことの重要さは論を俟たない。

ところが、ITの通史は邦文欧文とも存外少ない<sup>1)</sup>。生物研究の歴史を古代から概観し

た通史なら、すぐさま何冊も挙げるができる。シンガー (Charles Joseph Singer 1876-1960) の『1900年くらいまでの生物学史』(1931年)、テイラー (Gordon Rattray Taylor 1911-1981) の『生命の科学—図による生物学史』(1967年)、中村禎里 (1932-2014) の『生物学の歴史』(1973, 1983, 2013年)、八杉龍一 (1911-1997) の『生物学の歴史 (上・下)』(1984年) 等々。これに比較すると IT の通史は僅かと言わざるをえない。

情報科学の通史がほとんど存在しないのはなぜなのだろうか。もちろん、近代的な生物研究の歴史が 16~17 世紀に遡る歴史を有しているのに対し、情報科学は 1 世紀程度を閲するだけという事情が、通史の有無に作用しているのはまちがいない。しかし、要因は時間の長さだけでもないように思われる。時期も肝心だろう。自然科学は 19~20 世紀にかけて爆発的に発展し、実にさまざまな領域、すなわち分科に分化していく。まさに、分科の学としての科学が成立し、全体像を見渡すことの難しさが著しく増す。単独の著者が通史を執筆する対象ではなくなったと言ってよい。個別領域である生態学史・遺伝学史・分子生物学史等々の叙述のみが可能となっていく。上記の生物学史の通史も、実は 19 世紀以降は手薄なことが多い。

情報科学が近代的学知として誕生したのは、まさに科学が分科の学となったまっただなかであった。そして、後に見るように、情報科学は誕生すると同時に、ただちに分科の学として、個別領域が独自の発展を見せ、総体としての情報科学は諸領域のゆるやかな結合体としてのみの展開を余儀なくされていったように見受けられる。かくして、情報科学とはそもそも通史を叙述しにくい性格を端から有する学知なのである。

「なぜ、あなたはエベレストに登りたいのか？」と問われ、「そこにエベレストがあるからだ。」と応じたマロリー (George Herbert Leigh Mallory 1886-1924) にもじって言えば、「なぜ情報科学の通史的概観を試みるのか?」「これまで情報科学の通史がないからだ。」という事情が認められると言ってよいだろう。

もとより、本稿のような小論で、情報科学の通史を成就させることなど望むべくもない。だが、来るべき本格的な通史のために、その思想史的基盤を構築するささやかな作業くらいは試みておきたい。IT/情報科学に興味をもつ多くの者が陰に陽に抱いている情報社会の進展を小括し、その上でそこに見られる歴史理解に検討を加え、より成熟した歴史認識を得る跳躍台を用意することで責めを塞ぎたい。まずは、情報科学の創始を見定めることにしよう。

## 1 情報科学のマスターたち

もとより情報科学の創始は群像劇である<sup>2)</sup>。だがしかし、ここでは、ウィーナー (Norbert Wiener 1894-1964)・ノイマン (John von Neumann 1903-1957)・チューリング (Alan Mathison Turing 1912-54)・シャノン (Claude Elwood Shannon 1916-2001)

といった数名のマスターたちの活躍に焦点を絞ることにしよう<sup>3)</sup>。一次近似としては悪くない描像を得られるはずである。またむしろその方が、「木を見て森を見ず」の弊を避けられるかもしれない。ここで試みたいのは、詳細にわたる歴史記述などではなく、歴史の大枠をわしづかみにする「知の考古学」への道ならしなのだから。

彼らはいずれ劣らぬ俊英であった。博士号取得時の年齢は、ウィーナー18歳、ノイマン23歳、チューリング26歳、シャノン24歳である。4名とも数学で博士号を取得しており、シャノン以外の3名は数学基礎論の領域からテーマを選んでいる。タイトルを列挙すると、「シューレダーの関係代数とホワイトヘッド&ラッセルの関係代数における処理間の比較」(Wiener 1913、ハーヴァード大学)、「集合論の公理化」(Neumann 1926、ブダペスト大学)、「序数に基づく論理システム」(Turing 1938、プリンストン大学)、「理論遺伝学のための或る代数」(Shannon 1940、マサチューセッツ工科大学)となる。また、チューリング以外、複数の分野を専攻した多能さを示している(ウィーナーは生物学・哲学、ノイマンは応用化学、シャノンは電気工学)。

タフツ大学に11歳で入学したウィーナーは、数学を専攻し14歳で最優等で卒業した。ただし、当時の興味は生物学の方であったようである。自伝(ウィーナー 1964)においても生物学についてはそれなりに記述しているが、数学については淡泊である。当時の興味に従い、ハーヴァード大学大学院で動物学の習得を試みたが、実験生物学者にとって重要な眼のよさと手先の器用さにいささかの難があり、生物学を諦め、哲学を学ぶためコーネル大学大学院へ転じ、さらにハーヴァード大学の哲学に移り、20歳で博士号を得た神童であり、24歳でマサチューセッツ工科大学数学科講師に、29歳・34歳・37歳でそれぞれ助教授・准教授・教授に昇進している。

フォン・ノイマンはベルリン大学とチューリッヒ工科大学で応用化学を、ブダペスト大学大学院で数学をほぼ同時期に(!)に専攻し(高校時代に大学教授たちから数学の指導を受けていた彼は高校卒業後いきなり大学院入学が許された)、23歳で博士号(学位論文はその後Neumann 1928として公表された)と応用化学の学士号を取得し、24歳でベルリン大学の私講師、30歳でプリンストン大学高等研究所の教授となった。

チューリングはケンブリッジのキングス・カレッジで学び、中心極限定理を自力で証明するなど、優れた業績をあげたため、22歳で3年間有給で自由に研究に打ち込める特別研究員(フェロー)となり、後述する記念碑的な論文「計算可能数について、決定問題への応用とともに」(Turing 1936)を24歳で公表し、アメリカ合衆国にわたり26歳で博士号を得、戦時中の軍事研究(暗号解読)を経て、34歳で王立協会物理学研究所勤務となり、36歳でマンチェスター大学計算機械研究所副所長となった。

シャノンは16歳でミシガン大学に入学し、電気工学と数学を専攻して20歳で卒業すると、マサチューセッツ工科大学大学院に進みながら研究助手もつとめ、そのときに執筆した論文「リレー(継電器)とスイッチ回路の記号解析」は「たぶん20世紀でも最も重要で、かつ最も有名な修士論文」(Gardner 1987: 144)、「疑いもなく、今までに書かれ

たもっとも重要な修士論文の一つ」(ゴールドスタイン 1979:134)と評され、24歳で博士号を授けられた(同時に先の論文によって修士号も得ている)。25歳でベル研究所に入り、40歳のときマサチューセッツ工科大学教授に招かれている。

チューリング以外の3人も軍事研究に従事しており、そのときの研究が彼らの情報科学にも影響を与えている(たとえば、シャノンについては杉本(2007)を参照)。これについて詳述する予定がないので、ここで簡単に触れておこう。ウィーナーは第一次世界大戦時にすでに成人しており、志願したが直接兵役につくことはできず、弾道学的研究によって戦争に関ったが、そうした形態での関与にあまり満足はしていなかった。第二次世界大戦中も弾道学的研究に携わり、これがサイバネティクスに繋がっていくのは広く知られているであろう。ノイマンの原爆への積極的参加もまた広く人口に膾炙している。彼は開発に関わったのみならず、京都に原爆を落とすべきだ、などと使用法についても強硬な主張をしていた。その際の多量の計算を機械化することにより効率を高めたいという動機が、彼の電子計算機への関与をもたらしたのである。チューリングによって、ナチス・ドイツの暗号機エニグマによる暗号文の解読が果たされ、これは連合軍側の勝利に大きく役立ったことは疑いないのだが、暗号解読はトップ・シークレットであり、チューリングの貢献は長いあいだ知られずにいた<sup>4)</sup>。シャノンもベル研究所への就職直後、1940年代前半、対空防御システムの開発と、チューリング同様、暗号理論の研究に携わっている。シャノンの暗号研究には「暗号の数学的理論」(1945年)と「秘匿システムの通信理論」(1949年)があり、前者は軍事機密として、12年間公開を禁じられていた。

## 2 前史

### 2-1 計算機

1642年、パスカル(Blaise Pascal 1623-1662)は、収税吏だった父親のために加算のみが可能な、歯車を応用した手動加算機を作成したし、1671年、ライプニッツ(Gottfried Wilhelm Leibniz 1646-1716)は世界で初めて四則演算のできる機械式汎用計算機をつくった。19世紀になると、海運をはじめとする産業の進展に伴い、対数表等々、正確な数値表が社会的にいつそう求められるようになった。これを担ったのは computer と呼ばれる職業の人たちだが(女性も多かった)、作業量の多さ、間違いの混入しやすさが嫌われ、機械化・自動化が望まれていた。バベッジ(Charles Babbage 1791-1871年)による階差機関(difference engine)と解析機関(analytical engine)はこうした要請に応えようとした試みの注目すべき一例である。前者は正確な数表を手早くつくることを目標に1822年から開発が進められたが、この開発で得た知見に刺激されたバベッジは新たな着想をもち、数表づくりに限定されない汎用性をもつ計算機の開発に移っていった。階差機関は途中で断念されたのである。今日言うプログラムの概念が登場したのは解析機関においてであった。

しかし、これらは基本的に歯車等の機械式であった。これだと、どうしても時間がかかり、実用的ではない。これが解消されたのは、電子式計算機の実現によってである。したがって、この期間のコンピュータ史は機械的な部品が電子的なそれに置き換わっていく歴史でもある。

1879年2月、スワン (Joseph Wilson Swan 1828-1914) が炭素を使った白熱電球を発明したが、明るくするためにはフィラメントの温度は高くなければならず、すぐ蒸発してなくなり、寿命が短すぎ、とても実用に耐えなかった。同年、最適な素材を探すなど、フィラメント改良に成功し、実用的電球をつくっていったのがエディソン (Thomas Alva Edison 1847-1931) である。エディソンは同年、特許を取得している。ただし、炭素が電球内部に煤をつくり暗くなるという問題があった。これを回避するためにフィラメントのそばに金属プレートを設置した。1883年のことである。これが真空管開発のきっかけであった。というのも、その電球には交流を直流に直す整流作用が認められたからである。

さっそく利用したのが、フレミングの法則で有名なフレミング (John Ambrose Fleming 1849-1945) になる。マルコーニ無線社に関わっていた彼は、1904年、二極管を考案し、無線通信に応用した。さらに、ド・フォレスト (Lee De Forest 1873-1961) は、1906年、二極間にグリッドを設置した三極管を発明し、これはグリッドを流れる電流を増幅する作用をもつことを示したのである。その後、四極管以上の多極管も考案され、1920年代には真空管が広く普及することになった。こうした電子素材の進展が、計算機の電子化の背景となったと言えるだろう。

## 2-2 情報とエントロピー

クラウジウス (Rudolf Julius Emmanuel Clausius 1822-88) は、1850~60年代に熱力学の理論を発展させたが、その際、エネルギーを温度で割った物理量であるエントロピー  $S$  ( $S=Q/T$ [J/K]) なる概念を導入した。そして、ある系において外部とのやりとりがないとすると、その系はしだいにエントロピーを増す状態に進んでいくという熱力学第二法則を定式化した。エントロピーは不可逆的に進む現象の指標とみなせるのである。これを原子・分子の挙動と重ね合わせたのがマックスウェル (James Clerk Maxwell 1831-79) とボルツマン (Ludwig Eduard Boltzmann 1844 -1906) であった。彼らによれば、エントロピーが高いということは原子の乱雑さが大きいことと等しい。たとえば、今隣り合った2つの領域  $X$  と  $Y$  があり、4個の原子  $A \cdot B \cdot C \cdot D$  が存在し、自由に行き来できるとしよう。「どちらかの部屋のみすべての原子が集まっている」という状況は、 $X$  にすべてあるか、 $Y$  にすべてあるかの2通りしかない。「2つの部屋のそれぞれに2個ずつ原子が存在する」場合は、 $X$  に  $A \cdot B$  (必然的に  $Y$  に  $CD$ 、以下冗長になるので  $Y$  については省略)、 $A \cdot C$ 、 $A \cdot D$ 、 $B \cdot C$ 、 $B \cdot D$ 、 $C \cdot D$  の6通りある。後者の方が実現されやすいがゆえに、秩序が高い前者から乱雑さの大きい後者へ移っていくというのである。

1877年にはボルツマンによって関係式  $S = k \ln W$  が導き出された。ここで  $W$  は原子・分子が取り得る微視的状态の数、 $k$  はボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  [J/K]) である。 $\ln$  は自然対数である。このとき、「どちらかの部屋のみすべての原子が集まっている」という状況のエントロピーは、 $S = 1.38 \times 10^{-23} \times \log 2 = 0.96 \times 10^{-23}$  [J/K]、後者は  $S = 1.38 \times 10^{-23} \times \log 6 = 2.47 \times 10^{-23}$  [J/K] であり、後者の方がエントロピーが大きい。したがって、「どちらかの部屋のみすべての原子が集まっている」、つまり秩序が高い状況から、「2つの部屋のそれぞれに2個ずつ原子が存在する」乱雑さの増した状態へと移行していく。なお、こうした統計力学におけるエントロピーでは  $10^{23}$  個程度の分子の集団を想定することが多く、上記のような小さい値ではなく、数[J/K]程度の数値になる。

時間は遡るが、1871年、マクスウェルは奇妙な思考実験を公表した(Maxwell 1871)<sup>5)</sup>。今、仮想的な知的生物がいて、速い分子のみ  $X$  から  $Y$  へ、遅い分子のみを  $Y$  から  $X$  へ通すことができるとすると、乱雑さの低い状況に移行できる。1874年、ケルヴィン(William Thomson, 1st Baron of Kelvin 1824-1907) はこれを「マックスウェルの知的な魔物」と名付けた。熱力学第二法則に反することができる(ように見える)この魔物の能力の本態は何なのだろうか。以降、この課題をめぐって論争が開始されることになった。

着実な第一歩を踏み出したのはシラード(Leo Szilard 1898-1964) である。ルーズベルト大統領(Franklin Delano Roosevelt 1882-1945) 宛ての原子爆弾開発を勧める手紙に署名するようにアインシュタイン(Albert Einstein 1879-1995) を促したことで有名なシラードは、1929年、ピストンが2つある筒中に分子が1個のみ存在する「シラードのエンジン」モデルを考案し、マックスウェルの知的な魔物が速度を観測する過程で、マックスウェルの魔物以外の系が失うエントロピーを相殺するようなエントロピーが発生するという見解は明らかにした(Szilrad 1929)。ここにおいて、熱力学・統計力学といった物理的エントロピーと情報のあいだに密接な関連があることが示唆されたのである。

1930-1950年代にいくつかのイノベーションが生じることによって情報科学が創られたが、そのときまでの状況はあらましざっとこのようなものであった<sup>6)</sup>。

### 3 情報科学の成立

#### 3-1 計算の洞察：チャーチ=チューリングのテーゼ

キングス・カレッジのフェローであったチューリングが、前述した「計算可能数について、決定問題への応用とともに」なる論考において、計算可能という事態をはっきりさせるために、ある仮想的装置・計算モデル——後に、同様な問題に取り組んでいたプリンストン大学助教授チャーチ(Alonzo Church 1903-1995) が「チューリング機械」と名付けた——を提案した。これこそが、今日のコンピュータにつながるコンピュータの本態を初めて明示するものだったのである(Turing 1936, 1937)。

計算と言えば、加減乗除を思い浮かべるのが普通だろう。もちろん、四則演算は計算の典型である。しかし、「計算高い男」といった表現における計算は、四則演算のことではない。利害得失をあたかもそれらが数量化可能で四則演算等によって計算できるかのごとく冷徹に推定し、自ら利益が最大になると評価された選択肢のみを選ぶように振る舞うことを指し示している。つまり、計算にはこのような推定の意味も内包されている。ここでは四則演算等の狭義の計算を算術と呼ぼう。

ある仮想マシーンを考える。オートマトンと呼ばれるこの機械は複数の内部状態をもつ。そして、入力によって内部状態が変わりうる。それを受けて、何らかの出力もできる。次に、記憶装置と相互作用ができるオートマトンを考えてみよう。何らかの記憶装置があって、いくつかの区画に分かたれている。わかりやすいのは、テープがあって、それが映画のフィルムのように一コマコマに構成されている場合であろう。この記憶装置に対し、オートマトンが相互作用できて、記録装置から何らかの入力があると内部状態が変わり、ある出力を吐き出す。その際、テープを一コマ動かし、最初のコマの隣にあったコマに出力に応じて何らかの情報を記録できる。動かさずともよい。こうした、記憶装置とシステム化されたオートマトンが、チューリング機械の「ハードウェア」に相当する。どういう入力のときにどう内部状態が変わり、どう出力するかを規定するルールが付け加わったのがチューリング機械の総体となる。

あるルールをもったチューリング機械は、パスカルの加算機のような単機能計算機が可能な算術をしてみせることができる。これを加算チューリング機械と呼んでおこう。そればかりではなく、チューリング機械という思考実験がまずもって明らかにしえたのは、全算術がチューリング機械の動作に還元されることである。つまり、別のルールをもつ乗算加算チューリング機械もさらにまた別のルールを持つ除算チューリング機械も存在する。そればかりではなく、これらを包括する、およそあらゆる算術が可能な万能チューリング機械も存在する。このように、算術に関してチューリング機械は万能性・普遍性 (universality) をもつ。そして、ソフトウェアを工夫することで、つまり、チューリング機械に加算機として振る舞うような指令セット等々を記憶部から入力させることで、どんな算術も万能チューリング機械ならば遂行可能であるという見通しをチューリングは示してみせたのだった。つまり、

算術可能  $\longleftrightarrow$  一般的なアルゴリズムによって記述可能  
 $\longleftrightarrow$  万能チューリング機械によって実現可能  
 $\longleftrightarrow$  電子計算機=コンピュータで実行可能

ということである。1936年、チャーチはチューリングが考案した仮想マシーンをチューリング機械と名付け、チューリングの見通しを認め、広く共有することを提案した(チャーチの提唱)。以後、この提唱は「チャーチ=チューリングのテーゼ」と言われることになる。

かくて算術操作が、今日でいうアルゴリズムの形で明白に定式化され、万能算術機とし

てのコンピュータを構成するための基本指針が明確になったのである。これが「ホップ」であった。

### 3-2 計算の実現法と計算機のアーキテクチャー：ノイマン型コンピュータ

次はこの構想を実現する指針が確立されなければならない。この課題を一步押し進めたのが、1937年にシャノンが提出した「リレー（継電器）とスイッチ回路の記号解析」（Shannon 1937=1940, 1938）であった<sup>7)</sup>。これによって、算術の数値計算だけでなく、推定、つまり論理演算といった作業が可能になり、コンピュータの守備範囲が格段に広がり、また、回路としてどう具体化していけばよいのかが明確になったのである。これが「ステップ」になる。

これで計算とは何か、計算によって可能なことは何か、それをどう回路として実現すればよいかがかなり明瞭になった。しかし、これだけでは計算機は実現できない。たとえば、データをどうコンピュータに入力するかなどを定める必要がある。コンピュータのアーキテクチャー（設定構想）について、望ましい方式を考案しなければならない。

1920年代までに達成された部品群の充実のもと、アイオワ大学のアタナソフ（John Vincent Atanasoff 1903-95）とベリー（Clifford Berry 1918-63）が1937～1938年に開発をはじめ、1939年11月に完成したABCマシン（Atanasoff-Berry Computer）が初の全電子式計算であった。ABCマシンは280本の真空管からなり、320kg以上あり、29次元連立方程式を解くことのできるガウスの消去法専用機である。

エイケン（Howard Hathaway Aiken 1900-73）が考案し、IBMが製作したのがHarvard Mark Iである。1944年2月に出荷され、ハーバード大学が使用したため、名前にハーヴァードが入っている。データと命令を分離するアーキテクチャーをもつが、そうした様式はハーバード・アーキテクチャーと呼ばれる。ただし、同機はABCマシンより後の計算機だが、機械式と電子式が混在していた。計算機作成はビッグ・プロジェクトであり、アーキテクチャーは紆余曲折を経ながら、順次レベルアップしていったと言えよう。

黒川利明は、現在使われているコンピュータの基本特徴を次のようにまとめている。

(1) 人間は入力として、一組のデータを与える。(2) 機械がその動力を利用して、人間の与えた操作の種類とその順序（プログラム）にしたがって、一連のデータ処理操作を定められた方式で実行する。(3) 機械がデータ処理結果を表示する。(4) プログラムは機械の内部に、他の記憶と同じ形で蓄えられる。（黒川 1992: 30-31）

1945年に、現在のコンピュータの祖型としてこれらを明晰に定義したのがペンシルバニア大学グループであった（Neumann 1945）。上記特徴（4）に鑑み、このアーキテクチャーによったコンピュータはプログラム内蔵方式と呼ばれる。また、アーキテクチャー文章に記されている著者名により、フォン・ノイマン式とも言われる。ここから、プログラム内蔵方式（あるいはプログラム記憶方式）の考案者をフォン・ノイマンとす

る文献がかつては見られたが、今日これは疑問に付されている。ペンシルバニア大学グループにおける協働作業と捉えるのが適切なようだ。何からの事情によって、この協働作業を軍事機密絡みのしがらみが少なかったフォン・ノイマンの単独名で公表したということらしい<sup>8)</sup>。

ペンシルバニア大学グループの中心は、モークリー (John William Mauchly 1907-1980) とエッカート (John Presper Eckert 1919-1995) であった。彼らは 1943 年から ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) の開発を進め、1946 年に完成させていたが、この経験を活かし、フォン・ノイマンも加わり、1944 年から開発されたのが EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) であり、同機は 1951 年に完成された。なお、モークリーとエッカートは ENIAC が完成した 1946 年に EDVAC から手を引いている。

ENIAC は 17500 本近くの真空管、7200 個のダイオード、1550 個のリレー、70000 個の抵抗器、10000 個のコンデンサで構成された、30x2.4x0.9 m の 27 トンほどもある機械である。10 進法を用いており、電力は 150 kW ほども消費した。最初に計算されたのは水素爆弾に関することである。プログラムはまず紙上で行われ、これに基づき、スイッチやケーブルを構成することでなされた。これは 1 週間ほどかかる作業であった。

EDVAC は約 6000 本の真空管、12000 個のダイオード等で構成され、大きさはおよそ 8 トンほどであり、ENIAC よりはだいぶ小型化され、消費電力も 57 kW にまで下がっている。2 進法で計算し、1024 語のメモリをもつという、当時としては大容量の記憶領域を有する機器であった。

とはいえ、プログラミング内蔵方式を発案したペンシルバニア大学グループは、それを実現した世界初のチームにはならなかった。マンチェスター大学のウィリアムス (Frederic Calland Williams 1911-77)、キルバーン (Tom Kilburn 1921-2001)、トゥーティル (Geoff C. Tootill 1921-200) らによる、SSEM (Manchester Small-Scale Experimental Machine)、愛称 Baby は——実用機ではなく実験用というものの——、1948 年 6 月に作動したが、これが黒川の 4 条件を満たす初の計算機であった。Baby の後継機として Manchester Mark I (1949 年 4 月稼働開始) が開発されている。

また、英ケンブリッジ大学数学研究所のウィルクス (Maurice Vincent Wilkes 1913-2010) はフォン・ノイマンによるアーキテクチャー文章を手に入れると、目的を絞った小型コンピュータをさくさくと開発し、1949 年 5 月に EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) を稼働させている。使用された真空管は 3000 本、消費電力は 12 kW であった。

1948~51 年にかけて開発された Baby、Manchester Mark I、EDSAC、EDVAC といった一連の計算機が現在のコンピュータの祖型と言えるだろう。

### 3-3 情報量概念の成立と通信理論：シャノンの諸定理

情報科学創始のメルクマールの一つは、何と言っても、シャノンによる情報の数量化、すなわち情報量概念が確立された1948年であろう。自然科学をそれ以前の学問と分かつ特徴は、数量的把握・実験・機械論の3点セットであり、実に多様な意味内実を有する情報概念が自然科学にとって有用に再構成されるにあたっては、数量化という契機が欠かせなかったという次第である。シャノンはただ情報を数量化しただけではなく、さらに通信理論を確立した。以下、この経緯を確認していくことにしよう。

当時すでに電信などが社会的に普及していたが、こうした情報伝達における課題は、いかに速く、そして正しい内容を伝えるかであった。電流の速度イコール情報伝達の速度というわけではない。電流にのせられる情報量によって、当然異なってくるはずである。しかし、情報量をどう規定するのが妥当なのかが当時はよく分かってはいなかったのである。シラードがエントロピーと情報の関連を示唆する数年前から、通信工学において、情報の量的規定の探求が開始されていたが（Aspray 1985, 中岡 2015, 杉本 2007などを参照）、これもこうした問題意識のもとで試みと捉えなければならない。

#### 情報量の規定

情報量の規定で先陣を切ったのは、ベル研究所のナイキスト（Harry Nyquist 1889-1976）である。彼は1924年に通信速度  $v$  を検討し、 $v = K \log m$  なる式を導出した（Nyquist 1924）。たとえば、ある一定の時間間隔で、たとえば毎秒1ヶの信号を送受することが取り決められているとしよう。これを回線速度  $s$  と言う。1回に送出される信号の種類（要するに文字数）を  $m$  とする。たとえば、電気を流す、流さない、の区別をもうけるならば、 $m = 2$  になる。流さない、50 mA 流す、100mA 流すといった取り決めだと  $m = 3$  である。信号5つ分で単語1つを表すとすると、 $2^5=32$  なので英語は送りうるが、日本語は難しい。これを単語の文字長と呼び、 $n$  で表すことにしよう。自然言語では文字長はさまざまだが（a から supercalifragilisticexpialidocious まで）、ナイキストは通信路の能力差を明らかにするために、他の要因を固定する。送る言語系を英語なら英語に固定し、つまり等質な情報源のもとで、また文字長を固定した事例を最初の考察対象にする。したがって、ナイキストの分析は  $m^n$  が一定という条件のもとで遂行された。

さて、情報の伝達速度  $W$  は回線速度が速ければ速いほど、多く送れるはずである。伝達速度は回線速度に比例するとみなしてもよいだろう。また、単語の文字長が大きければ大きいほど、送信可能な情報は少なくなるはずである。したがって、適当な定数  $c$  を与えて、 $W=cs/n$  と書き表せる。ところで、 $m^n$  が一定という条件からその対数  $\log m^n = n \log m$  も一定であるから、また別な定数  $d$  を用い  $n \log m = d$ 、ゆえに  $n = d/\log m$ 。とすると、 $W = (c/d) s \log m$  と導出でき、情報の伝達速度は信号の種数の対数に比例することが分かる。ナイキストの式からは、信号の種数が多ければ多いほど、速度が向上する利得のあることが分かる。ならば、単純に考えると、信号の種数が多い方に進化しそうなものだが、

現在のコンピュータは<電流が流れる/流れない>の2値を用いている。これには信号の信頼性が関与しているのだが、ここではとりあえず、先に進むことにしよう。

伝達速度から情報量そのものへ進めた人物が、やはりベル研究所にいたハートレー (Ralf Vinton Lyon Hartley 1888-1970) である (Hartley 1928)。彼の発想の特徴は情報を選択と結びつけた点にあるだろう。情報を送るということは、 $m$  個ある文字から1つを選び出すことなのである。 $n$  文字からなる単語は  $n$  回の選択によって生じる。直観的に  $n$  が多いほど得られる情報も多いであろう。そこで、情報量なるものがあつたとしたら、それは  $n$  に比例するのではないか。そこで適当な定数  $k$  によって情報量  $H$  を  $H=kn$  だと仮定してみよう。さて、ナイキストと同様の条件  $m_1^{n_1} = m_2^{n_2}$  を設定する。文字数  $m_1$  から  $n_1$  個選んだときに与えられる情報は、文字数  $m_2$  から  $n_2$  個選んだときに与えられる情報と同じ量をもつのではないか。

$$H=K_1n_1=K_2n_2 \quad \therefore K_1/K_2 = n_2 / n_1$$

一方、条件より  $n_1 \log m_1 = n_2 \log m_2$  だから、 $n_2/n_1 = \log m_1 / \log m_2$

よって、 $K_1/K_2 = \log m_1 / \log m_2$

だとすると、 $K = \log m$  とするのがよさそうである。こうして、 $H=n \log m$  が情報量の候補として提案されることになる。

先行研究を受け、情報量を確率概念と結びつけて明確に規定した上で、一貫した理論体系を構築しえたところにシャノンに偉大さがあつた。ハートレーによれば情報を得ることは文字のセットから1つを選択することであつたが、その意義づけをシャノンは変更し、いままで不確実だった事柄が確定することだ、ある文字が選択される確率が違う確率に落ち着くことだと洞察した。 $m$ 文字あるとき、素朴な想定に立てば、各文字が選ばれる確率は  $p=1/m$  だが、実際選ばれた後はその文字の出現確率は1となる。だとすると、適当な係数  $a$  のもつて、情報量  $H$  は  $H=a \log m = a \log (1/p) = -a \log p$  と考えることができるだろう。五分五分の出来事が現に生じた際に得られる情報量を基本単位1とすると、この際の  $\log$  の底は2となるから、 $1 = -a \log (1/2) = a$  であり、情報量は  $H=-\log p$  [ビット]となる。

ここでついでに、前述した熱力学的・統計力学的エントロピー  $S=k \ln W$  ( $k=1.38 \times 10^{23}$ ) [J/K]と情報量  $H=\log(1/p)$ [ビット]の換算関係を与えておこう。 $W$  も  $1/p$  も基本的に「場合の数」なので同じと考えてよいから、 $S:H = k \ln W : \log (1/p) = k \ln W : \ln (1/p)/\ln 2 = k : 1/\ln 2 = k \ln 2 : 1 = 1.38 \times 10^{23} \times 0.693 = 9.57 \times 10^{24} : 1$ 。すなわち、1ビット  $= 9.57 \times 10^{24}$  J/K、あるいは  $1 \text{ J/K} = 1.045 \times 10^{23}$  ビットになる。ある現象を熱力学的・統計力学的レベルでとらえたときには数 J/K 程度になることが多いから、そうした現象の情報エントロピーを考えることはもちろんできるとしても、高々数万ビットのことが多く、桁が違いすぎる。「通常の情報過程を論じる場合には、その情報を担っている物理系のエントロピーの増減の問題は無視してしまつてよい」(甘利 2011: 46) ののである。

シャノン・モデル

こうした準備の上でシャノンは通信理論を築きあげたのである。まず指摘しておくべきなのは、通信に関するシャノン・モデル(図1; Shannon 1948a)であろう。シャノンは情報の伝達、すなわち通信を、様々な形式をとるメッセージ(情報)を、情報源が送信機器に伝え、送信機器が通信に適した電気信号に変換した上で通信路に流し、それを受信機器が受け取り、元の内容を復元することだとモデル化した。このモデルは戦時中の暗号研究からもたらされたと杉本(2007)は推定している。

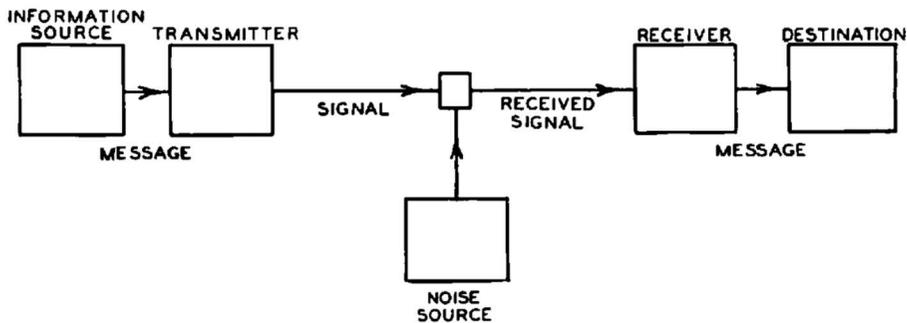


図1 情報伝達に関するシャノン・モデル

情報源符号化定理

”I love you.”という情報を、遠方にいるある人物のみに、他者に知られることなく、しかし他者に頼って送り届けたいとすると、暗号化という手法をとることになるだろう。原始的・初歩的な暗号化は、文字にある順序を与え(たとえば、あいうえお順やいろは順、abc順)、それを何文字分か、ずらすことによる。たとえば、abc……z.ab…なる順序を想定すれば、先の文章は”J mpwf zpwa”となり、これが他者に託され、受信者がずらされていた文字を元に戻すことによって、正しい内容を知る。(もっともこの暗号はさして暗号の役目を果たさないほど素朴するけれども。)こうした暗号化による送信が、実はより広い範囲の情報送信にも適用できることを提唱したのがシャノンの貢献になるだろう。

英文を送る場合、たとえば、”abc……xyz”とピリオド・カンマ・疑問符・感嘆符・空白の31の文字種を想定すればよい。これを<電流を流す/流さない>に<0/1>を対応させる方式で対処することにすれば、 $2^5=32$ なので、一つの文字に5回分のパルス電流の有無を割りあて、次のようにすればよい。

a  $\longleftrightarrow$  1(10進法)  $\longleftrightarrow$  00000 (2進法) ; b  $\longleftrightarrow$  2(10進法)  $\longleftrightarrow$  00001 (2進法) ;  
 ……; z  $\longleftrightarrow$  26(10進法)  $\longleftrightarrow$  11010 (2進法) ; .  $\longleftrightarrow$  27(10進法)  $\longleftrightarrow$  11011 (2進法) ;  
 ,  $\longleftrightarrow$  28(10進法)  $\longleftrightarrow$  11100 (2進法) ; ?  $\longleftrightarrow$  29(10進法)  $\longleftrightarrow$  11101 (2進法) ;  
 !  $\longleftrightarrow$  30(10進法)  $\longleftrightarrow$  11110 (2進法) ; 空白  $\longleftrightarrow$  31(10進法)  $\longleftrightarrow$  11111 (2進法)

このとき、英単語 1 文字分は符号化されるとすべて 5 文字になる。つまり、符号化後の平均単語長は 5 になる。平均単語長が短ければ短いほど、その符号システムは同一時間内に多くの情報が送信可能なのであり、効率がよい。では、平均単語長はどれほど短くできるだろうか。この問いに答えるのが情報源符号化定理 (シャノンの第一基本定理) である。

自然科学の定理はしばしば自然の限界を明らかにする。一例をあげると、熱力学第一法則によると、永久機関をつくることはできない。無からエネルギーを取り出せはしないのである。したがって、この法則は永久機関を作ろうとする無駄な努力を省いてくれる効用をもつ。情報源符号化定理が教えるのは、平均単語長を短くできる限界である。

シャノン・モデルに従えば、英語話者はアルファベット列を発信する送信者である。情報量概念の発想によると、各英文字には出現確率があり、それによって情報量が定まる。実際の英文字は e が最も多く使用され、次に多く使われるのは t と a になり、j や q・x・z は使用頻度が少ない。しかし、ここでは議論を見やすくするため、各英文字が同じ確率で用いられるとすると  $1/31$  であるから、それが実現されたときに得られる情報量は  $\log_2 31 = 4.95 \dots$  ビットになる。それぞれがおおよそ 5 ビットだから、平均値もおおよそ 5 ビットになる。こうした求めた平均値は、情報源のエントロピーと呼ばれる。そして、平均単語長は情報源エントロピーまでは短くできるのである。したがって、この例の場合、こうした符号化がほとんどベストで、これ以上短い符号化を考案するのは時間の無駄ということになる。

現実には、英文字が発信される確率にはばらつきがある。というのも、th と英単語が続けば、e なり a なり o なりが予測されるので、予測されたものが現に出現しても、得られる情報量は少ない。かくして、実際の英語の話者を情報源とみた場合、そのエントロピーは 1.3 ほどではないかと見積もられている。それゆえ、先の例よりも効率的な符号化が実はあるはずなのである。

### 通信路符号化定理

こうして、「情報源のエントロピーまで短い符号化を目指せ」という効率に関する指針が立った。しかし、たとえば、雷などによって電線を流れる電流は擾乱される。これは送信されるべき情報の正確さにとって脅威となる。では、情報伝達において正確さはいかほど保証されるのだろうか。効率的な符号化における状況と併行して、伝達する媒介に何らかの制限があって、つまり、「通信路のエントロピー」とでも呼ぶべきものがある、それが正確さの上限を決めるのだろうか。

まず、通信路には信号伝達速度の上限がある。これを越える率で情報を送信することはできないし、できたとしてもこうした状況で正確さを期待するのはナンセンスであることはあらかじめ確認しておこう。この上限は通信路容量と言われる。

情報伝達における誤りを訂正する試みはシャノン以前からなされてはいた。先の英文

字は、 $\langle 0/1 \rangle$ の2値を1単位として5単位で構成されている。それを6単位に変え、英文字に対応する6単位中の $\langle 1 \rangle$ の数を常に奇数になるように最後の1単位の符号を調整する。たとえば、以下のようにしておいて、最初の5単位分を実質的内容に用い、最後の1単位は誤り訂正用に使用する。

a  $\leftrightarrow$  000001; b  $\leftrightarrow$  000010; ……; z 110100; .  $\leftrightarrow$  110111; ,  $\leftrightarrow$  111000; ?  $\leftrightarrow$  111011; !  $\leftrightarrow$  111101; 空白  $\leftrightarrow$  111110

こうすれば6単位中に $\langle 1 \rangle$ が偶数個あれば、不正確な伝達が行われたことが分かる。もっともこれは原始的なやり方であって、誤りがあったことは分かるが、正しい情報は何かまで解明するに至らないし、擾乱によって、 $\langle 1 \rangle$ の数が1個加減するのではなく、2個加減された場合は、そもそも誤りがあったことすら分からない。

シャノンが通信路符号化定理(シャノンの第二基本定理)として明らかにしたのは、このような誤り訂正システムをうまく考案してやれば、通信路容量一杯の速度で送信しつつも、誤りをまったくなくせることであった。つまり、喜ばしいことに、そして、驚くべきことに、「通信路のエントロピー」とでも呼ぶべきものがあったとしても、それは零なのである。かくして、誤りを零にできるはずなのだから、そのような誤り訂正システムを考案せよ、という指針が明確になったのである。

これ以降、情報科学者たちは、情報源のエントロピーにまで効率化された符号方式と、誤り零をもたらず訂正システムの考案に勤しみはじめることとなった。

### 標本化

コンピュータにおいては、たとえば、 $\langle$ 電気を流す/流さない $\rangle$ といった形で情報を扱う。それぞれは0もしくは1と記号化される。音声は連続量(アナログ量)であるが、これがそのまま伝達されるわけではなく、一定の時間間隔において音声を標本化し、特性が分析され、離散値(デジタル量)に置き換えられる。連続量の一部しか用いないのだから、当然、情報は抜け落ち、情報が貧弱になるはずである。確かに、デジタル化によって、元々もっていた情報量は低下するのが普通である。しかし、ある条件のもとでは、デジタル化したあとでも元々の連続量を復元することができる。これを保証するのが、標本化定理である。この定理は、もともとはナイキストが1928年に述べたものだが(Nyquist 1928)、証明は1949年に染谷勲とシャノンによってなされた(染谷 1949, Shannon and Weaver 1949)。

この証明は、ある連続量を関数  $g(t)$  として捉えた上で、それを標本化した関数  $g_s(t)$  を導き、それがもつ面白い性質を利用する。まず、標本化定理における「ある条件」を確認することにしよう。音声も電気信号も波である。波には合成性と分解性がある。二つの波が出会うと、その二つを加え合わせた波が生じる。だとすると、ある一つの波があったとき、二つの波から合成されたものと捉えられるのだから、二つの波に分解することも可能である。かくして、周波数1の波、周波数2の波、……といった具合に基本的な波の成分に

分解していくことができる。これを実行するのがフーリエ変換という操作であり、どの基本的な波がどの程度の強さを含まれているかを示す。つまり、関数  $g(t)$  をフーリエ変換すると、周波数に対する関数  $G(f)$  を得られる。重要なのは、関数  $G(f)$  にフーリエ逆変換（逆フーリエ変換）という操作を加えると再び  $g(t)$  が求められることである。つまり、 $g(t)$  と  $G(f)$  は同じ事態についての異なる表現だと考えてよい。

もともと時間に対する連続量である関数である  $g(t)$  のフーリエ変換  $G(f)$  がある周波数範囲でのみ非零値をとること、逆に言えば、ある周波数（ナイキスト周波数と呼ばれる） $f_c$  があり、 $f > f_c$  もしくは  $f < -f_c$  のとき  $G(f) = 0$ （あるいは  $G(f) \equiv 0$ ）が成り立つこと、これが先の「ある条件」になる。これは、正の領域で考えれば、ナイキスト周波数より大きい高周波領域の基本波がその信号波には（ほとんど）含まれていないことを意味する。

さて、 $g(t)$  を一定の時間間隔  $\Delta t$  でサンプリングして、 $g_s(t)$  ( $t = \dots, -3\Delta t, -2\Delta t, -\Delta t, 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ ) を得たとしよう。重要なのは一定の時間間隔でのサンプリングである。あるときは 10 秒、あるときは 0.1 秒でサンプリングするといったことでは、元の関数は復元できない。ところで、このサンプリング自体も波と捉えることができる。そのとき、その波の周波数  $f_s$  は  $1/\Delta t$  になる。条件より、 $G(f)$  は周波数軸の  $f_c > f > -f_c$  においてのみ、 $2f_c$  幅のブロックとして存在する。興味深いのは、 $g_s(t)$  のフーリエ変換  $G_s(f)$  は、 $G(f)$  というブロックを周期  $f_s$  で繰り返したものになることであろう。もし  $f_s > 2f_c$  だとすると、それらのブロックは重なることがない。したがって、サンプルして得たデータをフーリエ変換したものが、離れて存在する周期的なブロック群になっていれば、それらから  $f_c > f > -f_c$  のブロック一つを取り出し、フーリエ逆変換を施せば  $g(t)$  が復元される次第になる。以上が、標本化定理の概要である。

正確に言えば、離散値のデータセットを  $g_s(t_k)$  ( $k = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ ) なる形式で与え、これに対して、離散フーリエ変換という変換を施して得られた関数を  $\Delta t$  倍したものが  $G(f)$  となり、これから  $g(t)$  が再現される。付け加えると、 $f_s < 2f_c$  の場合、ブロックが重なった関数となり、 $G(f)$  一つのみをうまく取り出すことができず、復元が不可能になる。

かくして、元々の関数が分かっている場合は、フーリエ変換によってナイキスト周波数を求め、その 2 倍を越える周波数でサンプルすればよい、ということになる。さらに付け加えると、理論的にはきっかり 2 倍でも復元できるのだが、 $G(f)$  のブロックを取り出すときにはフィルターにかける必要があり、現実のフィルターはそんなにきちりと取り出すことができないので、ナイキスト周波数の 2.2-2.4 倍をサンプル周波数とし、ブロックのあいだの零地帯をそれ相応に確保するようにするのが実際的である。もちろん、3 倍でも 5 倍でも復元できるのだが、データ数が増加し、計算量が増えるので、そうした無用なコストは避けるに越したことはない。かくして、アナログ量をどうデジタル化すればよいかについても、1949 年の時点で明確になったのである。

## 3-4 システム・情報・制御：思想家ウィーナーの意図されざる功績

これまで、チューリングやノイマン・シャノンが情報科学の設立期にどのような貢献をしたのか、その内容について記述してきた。しかし、ウィーナーが明らかにした研究内容を紹介したところで、なぜ彼が情報科学を創始した巨人の一人なのかは、おそらく必ずしも判然とはしないだろう。もちろん、情報科学における彼の寄与は第一級の水準を備えてはいる。たとえば、標準化定理に言及しており、フーリエ変換について触れたが、波をフーリエ変換によって分析できるのは、波が加法性をもつからである。二つの波があったとき、それがぶつかる場所では、それぞれの波を表現した式を足し合わせれば、ぶつかった場所での波を記述できる。しかし、自然界は加法性といった線形性のみでその性格が規定されるわけではなく、たとえば、乗法的な非線形性をもつ対象には——そうした現象で自然は満ちあふれている——、フーリエ変換では太刀打ちできない。こうした場合、花粉からこぼれ出た微粒子が水中をあちこち動くときに示す酔歩（random walk）を表す関数群に帰着することで分析できる。測度論を拡張し、これを明らかにしたのはウィーナー（たち）であった。情報システムへのアプローチ法を拡張してみせたこの成果は、しかし、これがなければ情報科学は創始されなかった類いの価値をもつとはいいがたい。情報科学に関し、その科学思想やそれを支える哲学の次元で鋭敏な指摘してきた西垣通はこう言う。「コンピュータの祖としての名誉はバベッジ、チューリング、ノイマンらのものだろう。情報理論は何といってもシャノンだ。これらのきらめく業績に比べると、ウィーナーの時系列信号の予測濾波理論は工学的成果としては小さい。……応用数学者としては、たいして成功しなかったという冷たい見方もできるのである。」（西垣 1991: 176-7）（なお、引用中の時系列信号の予測濾波理論は、酔歩関数とはまた別の、ウィーナーの重要な研究結果である。）つまり、第一級の成果は確かにあげてはいるものの、ウィーナーが情報科学を創始した巨人の一人とされるのは、そうした個別成果のゆえではない。個別の研究成果で「一本」をとったわけではないのである。

情報科学に対するウィーナーの貢献は何よりも、1948年に出版された『サイバネティックス——動物と機械における制御と通信』と同書がもたらした文化的インパクトに集約されよう。「発表された当時は……重要さから大きな反響を呼んだ。」（ウィーナー 2011: 訳者あとがき p.393）『『サイバネティックス』の投げかけた波紋は超弩級だった。」（西垣 1991: 158）「日本でも、終戦直後に米国からもたらされた情報に関する学問の双壁として、シャノンによる情報理論とウィーナーによるサイバネティックスが広く科学者や工学者に普及した。」（植松 2009: 213）

心理学者であり、認知科学の創始者の一人であるミラー（George A. Miller 1920–2012）が1951年マサチューセッツ工科大学で講演会した際、「ウィーナーの著作には新しいことは驚くほど少ない」と述べたと同書の「訳者あとがき」に記されているが、確かに同書で広く人口に膾炙することになったネガティブ・フィードバックも、実は知っている人は知っている制御システムであった。だとすると、新規性も備えてはいなかったと言えよ

う。

『サイバネティックス』(1948年)は8章構成であった(これは1956年、ウィーナー門下の池原止戈夫らによって邦訳されている)。章タイトルを羅列すると、「ニュートンの時間とベルグソンの時間(第1章)」「群と統計力学(第2章)」「時系列、情報および通信(第3章)」「フィードバックと振動(第4章)」「計算機と神経系(第5章)」「ゲシュタルと普遍的概念(第6章)」「サイバネティックスと精神病理学(第7章)」「情報、言語および社会(第8章)」となる。これからも推測されるように、『サイバネティックス』が言及する学問分野(discipline)は、数学・統計学・通信工学・制御工学・神経生物学・生体医工学・心理学・社会学に及ぶ。さらに、1961年に世に問われた第2版(邦訳1962年)では2章付け加えられ、人工知能や自己組織論にまで考察範囲が広げられる。

自然科学は自然哲学から発展し、赫々たる成果をあげてきたが、その発展は常に専門分化を伴うものであり、ある研究者はごくごく限られた領域しか理解できないといったような、「分科の学」の様相を呈し続けてきた。この蛸壺化を、「専門馬鹿」をうみだしかねない憂慮すべき事態ととらえる向きも多く、総合的科学の必要性が唱えられるようになっていたのだが、上記のように、さまざまな分野をある一定の枠組みでまとめあげる『サイバネティックス』は総合的科学の一つの具現化として歓迎された節はもちろんうかがえる。個別研究をまとめあげた総合科学としての側面は、確かにもちあわせてはいる。

「一本」級レベルの成果こそないものの、「技あり」レベルの個別研究をまとめあげることによって、はじめて示されたビジョンのゆえに成功し得た側面は確かに認められよう。

だが、実のところ、この評価も微妙である。なるほど、訳者あとがきでは、「ウィーナーが見事な統一をもたらした領域」(ウィーナー 2011: 257)とされるが、先に名をあげた西垣は、「数学的・哲学的雰囲気をもった一種の雑録」(西垣 1991: 159)と同書を位置づけるし、情報科学史学者杉本も「ウィーナーの著作『サイバネティックス』に見られる一種の雑駁さ」(杉本 2008: 28)を指摘する。シャノンの『通信の数学的理論』がもっていた体系性・統一性と同質な性質を『サイバネティックス』がもっていたとは到底言えない。総合科学性は成功の理由としては限定的であろう。

1948年は、ウィーナーよりも20歳年下のシャノンが、二つの基本定理を明らかにした年でもある。ウィーナーは神童であったにも関わらず、情報科学を創始した巨人の一人として登場したのはかなり遅く、また、鋭利な成果をひっさげて登壇できたわけでもない。西垣は、「名声のわりには、サイバネティックスの実体は虚ろだ」(西垣 1991: 176)とまで言い放つ。では、ウィーナーの貢献は、『サイバネティックス』は、裸の王様だったのだろうか。実質を欠いたまま、世間が誤解して賞賛したとでも理解すべきなのだろうか。

ある意味でそうだ。正確を期せば、実質を欠くとするのは言い過ぎである。実質はあった。それはサイバネティックスである。ウィーナーが意図していたのは、当然のごとく、サイバネティックスなる研究領野である。それは次のようなものだ。まず、ある要素群か

らなるシステムが存在する。そして、要素には、人が制御可能なものと、そうでないものがある。制御可能な要素を操作することによって、そのシステムを操作者の望む状態に至らしめる。こうした営為を可能にする理法がサイバネティクスなのである。サイバネティクスはもともと舵取り術を意味する。こうした領野の有望性を世に知らしめること、これがウィーナーのそもそもの発意であった。

ただし、同書翻訳岩波文庫版の訳者あとがき（著者は戸田巖）にはこう記されている。「ウィーナーの提唱したサイバネティクスは通信と制御の観点から機械、生体、社会を統一して扱おうという学問分野である。この50年で数学、工学の観点からのサイバネティクスの評価は確立したといってもよい。社会学のおよび生理学的にどう位置づけるかが問題である。」(pp.400-401) これは、半世紀以上を闊した現時点でも、その領野は一つの学問分野 (discipline) をなしてはいないことを意味する。学問分野としては、あくまで数学や工学等々が存在するのであり、それぞれの学問分野がサイバネティクスをその下位領域として組み込んでいる（あるいは、組み込めていない）といった状況なのである。サイバネティクスという一つの学問領域があり、つまり、サイバネティクス学会があり、大学にサイバネティクス学科があり、次世代のサイバネティクス学者がそこで育成されており、そのための標準的な教科書が用意されている、というわけではないのである。サイバネティクスなる研究領野のもつ「虚ろさ」は、このあたりにも起因する。

いろいろな事例を取り上げながら、『サイバネティクス』の分析において前提されているのは、以下のような情報論的モデルである。「あるシステムがある。そして、システムを構成している要素がある。要素間は連絡されており、そこを情報が行き交う。こうしたシステムは、情報を記憶したり、処理したりする。情報に基づいて、システムの挙動もまた制御されうる。」

今聞けば至極当たり前のこのモデルは、しかし、100年前は当然ではなかったことを私たちは思い返す必要があるだろう。たとえば、ここであっさり情報なる言葉と概念を用いているが、こうした情報概念の現代的理解が広く共有されるは、せいぜい1960～70年あたりであって、それを遡ることはない。それ以前は、情報といえば、軍事機密等を典型例とする、今日言う極秘情報のことであった（小野 2016）。ある知識を知らせたくない側があり、知りたい側があった場合にのみ、情報という言葉・概念が使用された。現在では、知らせたくないアクターという契機を欠いたとしても、情報という言葉・概念は使われる。

『サイバネティクス』によって、森羅万象について、それに関する知識一般を情報と捉えるエピステーメーが広く共有され、また、これまで知られていたネガティブ・フィードバックは情報論的モデルのかくかくしかじかの部位について述べているのであり、シャノンの通信理論はこの箇所に関係しており、といった具合に、それまでの成果等が情報論的モデルをハブとして結びつけられ、その有機的連関性と潜在力、将来の有望性が指し

示されることになった。リッドは、「そこでサイバネティックスの登場になる。それは未来のマシンとその潜在能力についての大胆な理論だった」(リッド 2017: 10, 傍点は引用者による)としたが、これは傾聴に値する見解であろう。『サイバネティックス』がもたらしたのはサイバネティックスではなかったのである。『サイバネティックス』は情報論的モデルの広い社会的共有と、それに基づいた有望な未来像をもたらし、それによって、諸領域が有機的に結びつき、情報科学という画定された領域の出現を促すことになったのである。

こうして、1936~1948年に、情報を処理するとはどういうことか(チューリング=チャーチのテーゼ 1936)、情報を処理する機械をどうやってつくればいいのか(ノイマン型コンピュータのアーキテクチャー 1944)、情報を伝達するにはどうすればいいのか(シャノンの第一基本定理と第二基本定理 1948)、情報システムとはそもそも何か、あるいは、世界を情報システムとして見るとはどういうことか、そして、それはどのくらい豊かな実りをもたらしうるのか(ウィーナーによる『サイバネティックス』の前提として情報思想 1948)が明らかにされることによって、情報科学は創始されたのである。

そのような情報科学がどう発展・展開していったかについては、次の機会に譲ることにしよう。

## 註

- 1) 情報一般ないし情報技術については星名(2006)やグリック(2011)・中野(2017)等々、コンピュータ史もゴールドスタイン(1979)等々がある。高橋(1983)は情報科学史を標榜する数少ない書籍の一つだが、正確には情報科学に至るまでの歴史であり、私が情報科学の創始期とする時期までしか述べられていない。IT/情報科学の個別領域の通史はいくつか存在するが、IT/情報科学とされる領域を展望するような通史はあまりない。
- 2) この時期、情報科学の創始者たちが取り組んだ問題はホットなテーマであって、さまざまな研究者がしのぎを削ったため、ほぼ同時期に独立してなされた発見がいくつもある。たとえば、リレーによる論理回路形成は、シャノンに1~2年先駆けて、中嶋章(1908-70)が明らかにしている(中嶋 1935等)。チューリング・マシンと同様な機械(いわゆるポスト・マシーン)をフランスのポスト(Emile Leon Post 1897-1954)が考案していたし(Post 1936)、チャーチによるラムダ計算(Church 1936)とチューリング・マシンは等価であった。また、標本化定理は、ナイキスト(Harry Theodor Nyquist/Nyquist 1889-1976)が1928年に予測し(Nyquist 1928)、シャノン(Shannon and Weaver 1949)と染谷勲(1915-2007)によって1949年に独立に発見されている(染谷 1949)。
- 3) 高橋(1983)はウィーナー・シャノン・フォン=ノイマンを開祖とする流れの展開として、情報科学の歩みを記述した。また、西垣(1991)は情報学のマスターたちの思想的

検討を試みているが、そこでは、バベッジ (Charles Babbage 1791-1871)・ウィーナー・フォン・ノイマン・ベイトソン (Gregory Bateson 1904-1980)・チューリング・シャノンの6名が論じられている。

- 4) チューリングはホモセクシャルであることをあえて隠そうとはしていなかった。当時、ホモセクシャルは法律違反であり(!)、チューリングは服役するか、ホルモン療法を受けるかの選択を迫られ、後者を選んだ。ところで、チューリングは若くして変死したが、上記のごたごたがそれに影響しているのではないかとする見方も存在する。これに関連して、もしチューリングがイギリスを戦勝に導いた立役者の一人であることが早くから知られていたら、ごたごたに伴うストレスも少なく、チューリングの死に方も変わったのではないかとする穿った見方もある。
- 5) 初出は1867年の友人宛書簡になる。
- 6) 英語では、計算機科学に相当する computer science なる言葉は、情報科学 information science と同義と解される場合も多いほどである。英語の information science を聞いたとき、それを母語とする者は図書館情報学を思い浮かべやすいため、総体としての情報科学を言い表す場合、むしろ computer science が好まれるようだ。
- 7) シャノンのこの修士論文の出版年については、1937年・1938年・1940年と表記に揺れが見られるが、これは以下の事情に基づく。英文タイプによる論文の著者署名欄には1937年8月10日と記されており、正式に提出されたのはこのときになるであろう。そして、マサチューセッツ工科大学が修士論文として刊行したのは、すなわち電気工学の修士号を取得したのは1940年になってからのことであった。1938年3月1日には概要をアメリカの電気工学会に提出し、同年6月に口頭で発表され、提出した概要が刊行されたのが同年5月17日であった。
- 8) この構想はノイマン一人の産物ではなく、モークリーやエッカートのチームと協議しながら仕上げられたと推定されている。軍事機密に属し、モークリーやエッカートは軍と契約していたので名前を出さない方がよかつたらしいこと、ペンシルバニア大学が高名なノイマンの名前を華々しく利用しなかったらしいことなどが、単独著者名になった理由ではないかと言われている。

## 文献

安西祐一郎(1998)「情報[英]information」、廣松渉・子安宣邦・三島憲一・宮本久雄・佐々木力・野家啓一[編]『哲学・思想辞典』岩波書店、781-782。

Aspray, W.(1985) The Scientific Conceptualization of information: A survey. *Annals of the History of Computing* 7(2): 117-140.

アウグスティヌス(2014)『告白 III』山田晶訳、中公文庫。

Church (1936) Unsolvability problem in elementary number theory, *American Journal of*

*Mathematics* 58: 345-363.

Gentzen, G. (1936) Widerspruchsfreiheit der reinen Zahlentheorie. *Math. Ann.* 112: 493-565.

Gardner, H. (1987) *The Mind's New Science: A History of the Cognitive Revolution*. Basic Books. ハワード・ガードナー (1987) 『認知革命—知の科学の誕生と展開』佐伯胖・海保博之監訳、産業図書。

ゴールドスタイン、ハーマン・H (1979) 『計算機の歴史—パスカルからノイマンまで』末包良太・米口肇・伏伏茂之訳、共立出版株式会社。Hermann H. Goldstein (1972) *The Computer from Pascal to von Neumann*. Princeton University Press.

グリック (2013) 『インフォメーション—情報技術の人類史』楡井浩一訳、新潮社。James Gleik (2011) *The Information: A History, a Theory, a Flood*. NY: Pantheon Books.

Hartley, R.V.L.(1928)Transmission of information. *The Bell System Technical Journal* 7(3): 535-563.

Hilbert, D. and W. Ackermann (1928) *Grundzuge der theoretischen Logik*, Springer. ヒルベルト&アッケルマン (1960) 『記号論理学の基礎』伊藤誠訳、大阪教育図書株式会社。ヒルベルト&アッケルマン (1974) 『記号論理学の基礎 (改訂最新版)』石本新・竹尾治一郎訳、大阪教育図書株式会社。

星名定雄 (2006) 『情報と通信の文化史』法政大学出版局。

黒川利明 (1992) 『ソフトウェアの話』岩波書店。

中村禎里 (1973) 『生物学の歴史』河出書房新社。----- (1983) 河出書房新社。----- (2013) 筑摩書房 (ちくま学芸文庫)。

中野明 (2017) 『IT 全史—情報技術の 250 年を読む』祥伝社。

中岡香林 (2015) 『通信理論におけるシャノンによる情報の量的表現の独自性について』東京大学提出修士論文 (大学院総合文化研究広域科学専攻基礎科学系)。

中嶋章 (1935) 「継電器回路の構成理論」『電信電話学会雑誌』150: 731-752。

Neumann, John von (1928) Die Axiomatisierung der Mengenlehre. *Mathematische Zeitschrift* 27 (1): 669–752.

Neumann, John von (1945) *First Draft of a Report on the EDVAC* by Contract No. W-670-ORD-4926 Between the United States Army Ordnance Department and the University of Pennsylvania

西垣通 (1991) 『デジタル・ナルシス—情報科学パイオニアたちの欲望』岩波書店。----- (1997) 『デジタル・ナルシス—情報科学パイオニアたちの欲望』岩波書店 (岩波同時代文庫)。----- (2008) 『デジタル・ナルシス—情報科学パイオニアたちの欲望』岩波書店 (岩波現代文庫)。

- Nyquist, H. (1924) Certain factors affecting telegraph speed. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 43: 412–422.
- Nyquist, H. (1928) Certain topics in telegraph transmission theory. *American Institute of Electrical Engineers Transactions* 47(2): 617-644.
- 小野厚夫 (2016) 『情報ということば—その来歴と意味内容』 富山房インターナショナル。
- パリサー、イーライ (2016) 『フィルターバブル—インターネットが隠していること』 井口耕二訳、ハヤカワ文庫。(2012) 『閉じこもるインターネット—グーグル・パーソナライズ・民主主義』 井口耕二訳、早川書房。Eli Pariser (2011) *The Filter Bubble: What the Internet is hiding from you*. Penguin Press.
- Post, E. L. (1936) Finite combinatory Processes - Formulation I. *The Journal of Symbolic Logic* 1 (3): 103-105.
- リッド、トマス (2017) 『サイバネティクス全史——人類は思考するマシンに何を夢見たのか』 松浦俊輔訳、作品社。Thomas Rid (2016) *Rise of the Machines: A Cybernetic History*, W.W. Norton and Co.
- Shannon, C.E. (1937 = 1940) A symbolic analysis of relay and switching circuits, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering, Master Thesis.
- (1938) A symbolic analysis of relay and switching circuits, *Trans. AIEE* 57: 713-723, paper number 38-80.
- (1940) *An algebra for theoretical genetics*, Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- (1948a) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27 (3): 379-423.
- (1948b) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27 (4): 623-666.
- and Warren Weaver (1949) *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press. シャノン、C.E. & W. ヴィーヴァー (1969) 『コミュニケーションの数学的理論—情報理論の基礎』 長谷川淳・井上光洋訳、明治図書。シャノン、クロード & ワレン・ウィーバー (2009) 『通信の数学的理論』 植松友彦訳、筑摩書房 (ちくま学芸文庫)。
- Singer, Charles Joseph (1931) *A Short History of Biology to About the year 1900: A General Introduction to the Study of Living Things*. Oxford: Clarendon Press. ----- (1950) *A History of Biology to About the year 1900: A General Introduction to the Study of Living Things (revised ed)*. London: H.K. Lewis. ----- (1959) -----, 3rd ed. London: Aberlard-Schuman. チャールズ・シンガー (1999) 『生物学の歴史』 西村顕治

訳、時空出版 [邦訳は第3版]。

Szilard, Leo (1929) Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. *Zeitschrift für Physik* 53 (11–12): 840–856.

染谷勲 (1949) 『波形伝送』 修教社。

杉本舞 (2007) 「C.E.シャノンによる情報概念の導入について—通信理論と暗号理論の分析を通じて」『科学史研究』46(243):145-154。

----- (2008) 「ウィーナーの「サイバネティクス」構想の変遷: 1942年から1945年の状況」『科学哲学科学史研究』2:1-28。

サンスティーン、キャス (2003) 『インターネットは民主主義の敵か』 石川幸憲訳、毎日新聞社。 Cass R. Sunstein (2001) *Republic.com*. Princeton University Press.

高橋秀俊 (1983) 『岩波講座情報科学 1 情報科学の歩み』 岩波書店。

田島節夫 (1970) 「情報 information」、山崎正一・市川浩『現代哲学事典』 講談社 (講談社現代新書)、336–339。

Taylor, Gordon Rattray (1967) *The Science of Life: A Pictorial History of Biology*. London: Panther Books. テイラー (1976, 1977) 『生物学の歴史 (上・下)』 矢部一郎・江上生子・大和靖子訳、みすず書房。

Turing, A. (1936) On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2nd series 42: 230-265. チューリング (2014a) 「計算可能な数について、その決定問題への応用」 佐野勝彦訳、伊藤和行[編]『コンピュータ理論の起源[第1巻 チューリング]』 近代科学社、16–54頁。

----- (1937) On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, A correction, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2nd series 43: 544-546. チューリング (2014b) 「計算可能な数と決定問題への応用、訂正」 佐野勝彦訳、伊藤和行[編]『コンピュータ理論の起源[第1巻 チューリング]』 近代科学社、55–57頁。

----- (1938) *Systems of logic based on ordinals*, Ph. D. thesis, Princeton University

植松友彦 (2009) 「訳者解説」、シャノン&ウィーバー (2009) , pp.213-231。

Wiener, Nobert (1913) *A Comparison Between the Treatment of the Algebra of Relatives by Schroeder and that by Whitehead and Russell*, Ph. D. thesis, Harvard University, Cambridge, Mass.

----- (1948) *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The Technology Press, John Wiley & Sons, Inc., Hermann & Cie. ノーバート・ウィーナー (1957) 『サイバネティックス—動物と機械における制御と通信』 池原止戈夫・彌永昌吉・室賀三郎訳、岩波書店。

- (1961) *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine* (2nd ed). MIT Press. ノーバート・ウィーナー (1962) 『サイバネティックス—動物と機械における制御と通信』池原止戈夫・彌永昌吉・室賀三郎・戸田巖訳、岩波書店。
- (1964) *I Am a Mathematician*. MIT Press. (1983) 『神童から俗人へ—わが幼時と青春』鎮目恭夫訳、みすず書房。
- (2011) 『サイバネティックス—動物と機械における制御と通信』池原止戈夫・彌永昌吉・室賀三郎・戸田巖訳、岩波書店 (岩波文庫)。
- 八杉龍一 (1984) 『生物学の歴史 (上・下)』日本放送出版協会。