

連載

世界をORする視線 (15)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(3) コンピュータの発展：コンピュータ科学の 数学的基礎 (続き 2)

住田 潮

(註：本稿は前回からの続きであるので、文献リストは継続し、新たに必要となる分を追加する。)

1. 情報時代の父クロード・シャノン

今日あるデジタル情報社会の基礎を築くのに貢献した多くの技術者や研究者の中で、一際、異彩を放つのが、「情報時代の父」と呼ばれるクロード・エルウッド・シャノン (Claude Elwood Shannon) [11–13] である。

シャノンは広い分野で多大な研究成果を挙げたが、コンピュータ分野に限っていえば、二つの巨大な足跡を残している。一つは、1937 年、21 歳の若さで執筆した MIT での修士論文「リレーとスイッチ回路の記号論的解析 (A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits)」であり、世界で初めて、ブール代数を電氣的スイッチ回路で表現することに成功した。ブール代数で表現できる論理はすべて電気回路で置き換えることが可能であることを証明し、それ以後の電氣的・電子的デジタル回路設計の基礎を築いた。

コンピュータ分野におけるシャノンの二つめの大きな貢献は、1948 年の大作「通信の数学理論 (A Mathematical Theory of Communication)」である。全く同じ紙に全く同じ量のインクを用いて、しかし異なる内容が印刷された二つの文書は、物質的な構成は同等であっても、人間にとっての意味合いは全く異なる。この差異を定量的に扱うべく、物理的存在から情報を切り離し、独自の体系を確立したこの論文は、コンピュータを数値計算から解き放ち、文字、音声、画像を分け隔てなく処理できるコンピュータの汎用性を現実のものとした。今日、われわれが当たり前のように経験しているデ

ジタル社会を実現することができたのは、シャノンが確立した情報理論に負っていると言っても過言ではない。

ここでは、この二つの貢献を中心に、シャノンの研究者としての足跡を追う。

2. 機械工作に夢中の少年時代

シャノンの両親は、アメリカミシガン州の北部に位置するオトセゴ郡 (Otsego County) の郡庁所在地、ゲイロード (Gaylord) 市に住んでいた。人口は 3,000 人ほどで、積雪量が多く、長い冬にはスキー・リゾートとして賑わい、短い夏にはゴルファーが集う観光地であった。父親はアメリカ各地をセールスマンとして巡回した後、20 世紀に入った頃にゲイロードに定住し、家具販売と葬儀を手掛けるビジネスを買い取って成功した。メソジスト派の熱心な信者であり、筋金入りの共和黨員でもあった。教育委員会、貧困対策委員会、カウンティ・フェア実行委員会のメンバーであり、町の名士となる。11 年間にわたってオトセゴ郡遺言検認判事を務め、不動産を巡る争いや小さな金銭トラブルを解決する一方、公証人としても働き、地元の政治家のようなことまでしていた。

ミシガン州のような田舎では大学を卒業する女性は珍しかったが、母親のメイベルはその例外で、担当教授からの輝かしい推薦状を携えてゲイロードにやってくると、ゲイロード高校の国語教師の職に就き、後には同校の校長となった。地元ではちょっとした歌手として知られ、町の行事や葬式でその美声を披露した。1909 年、クロード・シニアと結婚するが、その記事が地元新聞の一面を飾るほどに、2 人はゲイロード社会を華やかに彩る存在であった。結婚当時は 29 歳、当時としては晩婚であるが、夫より 18 歳も年下であった。翌年には長女のキャサリンが生まれ、その 6 年後

すみた うしお

筑波大学名誉教授

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

の1916年4月30日、シャノンは隣接するペトスキー(Petoskey)市の病院で生まれた。

シャノンの子ども時代は比較的、平凡なもので、むしろ目立っていたのは姉キャサリンの方であった。学業は極めて優秀で、ピアノを弾き、数学パズルをせっせと作っては弟に解かせていた。後にシャノンは、「姉は模範的な学生で、とても真似でできなかった。そもそも数学に興味をもったのは、姉に対する対抗心であったかも知れない」と述懐している。キャサリンは、ミシガン大学で数学を専攻して修士号を修め、イリノイ州のノースセントラル・カレッジの数学教授となった。

シャノンの少年時代の才能は、機械工作に向けられた。模型飛行機の方向舵の仕組みや、おもちゃの船のプロペラ・シャフトを何時間でも見続けるような子どもであった。町でラジオが壊れたと聞けば喜んで修理を引き受け、ボーイスカウトのモールス信号を身体で表現する技を競う大会では、人間電信機のような正確さとスピードを発揮して優勝した。こうした才能は、おそらく隔世遺伝であった。祖父のデイヴィッド・シャノン・ジュニアは米国特許をもつ優秀な発明家で、洗濯機に取り付ける「汚れた沈殿物や排水を排出するレシプロ・プランジャーとバルブ」を開発した。この祖父はシャノンが生まれる6年前に他界していたが、家系図の中に本格的な発明家がいたことは、シャノン少年のちょっとした自慢の種だった。

「子どものときは、機械をいじるのが好きでね、色々なものを組み立てたよ。電気機器、無線機、ラジコンの船も作った」とシャノンは後に回想している。親友のハッチンズと一緒に、彼の家を納屋にエレベーターを取り付け、親友の妹を乗せて喜ばせたという。2人はハッチンズ家の裏庭に手製のトロリーを走らせ、有刺鉄線を利用して1キロ以上も離れている2人の家を結ぶ電信装置を開設したという逸話も残されている。高校時代には、電報を配達したり地元の百貨店でラジオ修理の仕事をしたりして小遣いを稼いだ。

シャノンはトーマス・エジソンを崇拝していたが、2人が似通っていたのは、あながち偶然ではないかも知れない。シャノン少年とエジソンには、共通の先祖がいたのである。ジョン・オグデン(John Ogden)という清教徒の石工で、イギリスのランカシャーから海を渡ってニューイングランドに移住し、その後、コネチカット州のスタンフォードに移って、ダム建設や製粉所の建設に携わった人物である。1642年、弟と協力してニューヨークのマンハッタンに常設の石造り教会の建設を始め、1644年の春に完成させた。ゴシック

様式で、石切場での作業から風見鶏の設置まで、一切をオグデンが取り仕切った。3世紀後、そこから3キロほどしか離れていないオフィスで、シャノンは情報時代の土台となる研究に取り組むことになる。オグデンは、生まれて間もない新世界の建設に貢献した移民の1人であり、同じ1644年、ロングアイランドでアメリカ最初の捕鯨会社を立ち上げてもある。

3. ミシガン大学工学部へ

シャノンは科学を好んだが、規則性を見いだせず、原則を欠く事実をたくさん記憶しなければならないような科目は苦手であった。その典型例が有機化学で、後に、科学担当の教師に、「化学の学習は、いつも退屈でした。個別の事実が余りにも多く、一般的な原則が少なすぎて、はくすの趣味には合いませんでした」と手紙で打ち明けている。1932年、姉の後を追ひ、ミシガン大学への入学を志す。入学願書と共に提出されたシャノンの成績表は、数学と科学とラテン語がA、それ以外の科目はBがちらほらといった具合で、取り立てて際立ったものでもなかった。その年、姉は数学専攻で修士課程を卒業したが、17歳となったシャノンも入れ替わるように工学部に合格し、秋の入学を迎えた。

1932年はアメリカの大統領選挙が行われた年であり、民主党のフランクリン・ルーズベルトは、ミシガン州をはじめとする42州で圧勝した。しかし、ミシガン大学が位置するアナーバーだけは、現職のフーバー大統領の支持を貰った。アナーバーの地方議会はフーバー大統領と同じ共和党が多数派を占めており、陰に陽に大統領の影響力の恩恵を受けてきた経緯があった。しかし、この選挙の敗戦により、大恐慌から未だ完全に回復しきっていないアメリカ経済のただ中で、アナーバーは重苦しい雰囲気包まれていた。特に、アナーバー最大の雇用主として地域経済を牽引してきたミシガン大学は、シャノンが入学した頃には財政が破綻し、新入生の人数の削減、計画中の建物の建設中止、職員の給与の10%カット、といった苦しい状況に追い込まれていた。

シャノンにとって幸運だったのは、20世紀に入り、ミシガン大学ではモートー・エルウィン・クーリー(Mortimer Elwyn Cooley)工学部長が辣腕を振るってカリキュラムを一変させ、工学部だけは急成長を遂げていたことである。クーリーは、もともと海軍の派遣教授としてミシガン大学に赴任してきた人物で、蒸気工学と造船が専門であったが、海軍から退役を認められたのを機に、ミシガン大学から正式に教授の椅子を提供された。

1895 年, 当時, 工学部の学部長であったチャールズ・グリーン (Charles Green) は, 増加傾向にあった工学部学生を収容するための新校舎建設計画を立案するよう大学当局から命じられ, 5 万ドルの予算で小さな U 字型の校舎案を提出し, 承認された. しかし, 建設が始まる前に逝去したため, 後任としてクーリーに白羽の矢が立てられた. 前任者の建設計画と予算案に関して意見を求められると, クーリーは躊躇なく次のとおりに答えた.

「いいですか, われわれの競争相手となる他大学の工学部を見ていただきたい. そうすれば, 一瞬のためらいもなく 25 万ドルを投じる気持ちになるはずです」

自信に満ちあふれてはいても謙虚さを失わない彼の態度は理事たちの心を動かし, その要求は直ぐに認められた.

1913 年に行われた工学部の一般公開は, さながら世界科学万博のごとくであった. 1 万人が施設の見学に訪れ, 最新技術の素晴らしさに目を見張った. 電気技師は, 当時はまだ最新式であった無線システムでメッセージを送信する様子を実演し, 機械技師も 1 分間に 2 万回も回転する紙で木を切ったり, 液体空気の中で花を凍らせたりした. また, 2 本の細いワイヤーだけでボトルを吊るし, しかも, そのワイヤーから水が止めどもなく流れ続ける様子は謎であり, 来場者を心底, 驚かせた. ほかに, 中身を詰めた魚雷 2 本と大砲 2 台が展示され, 構内を走る閉塞信号システムを備えた完全な電気鉄道に乗り, さまざまなデモンストレーションを見学して回ることもできた.

工学部の拡大を目指したクーリーのプロジェクトは, 学部の必修プログラムにも革命的な変化を引き起こした. 無線通信の訓練を受けたエンジニアに対する社会的なニーズの高まりを予見し, シャノンが生まれる 8 年前には, 無線電信と電話理論を教える講座が開設されていた. 工学部のカリキュラムは多彩になり, 他分野にも跨がる内容もち, 学問を隔てる境界線は曖昧になっていった. 特に, シャノンが数学と工学の学位を同時に取得することを目指し始めた頃には, 二つの分野のカリキュラムは一つに統合されていた. シャノンが入学する 1932 年の秋には, 工学部の入学者数は 30 人未満から 2,000 人を超えるまでに増加し, 3 人の講師でいくつかの講義を掛け持ちしていたのが, 160 人以上の教授やスタッフが 100 以上の講義を受け持つまでに成長していたのである.

シャノンが複数学士号の取得を目指したのは, 数学と工学のどちらが好きなかを, 自分でも決めかねて

いたからであり, クーリーのカリキュラム改革によって複数学士号を取得することが, それほどの負担にはならなかったからでもある. 工学といっても色々あるが, シャノンは理論と実践が不可分に結び付いている通信工学に魅了された. また, 数学の面では, プールの論理代数の講義を受講し, その手ほどきを受けた. これらの学びの経験の中で, 後のシャノンの独創的な偉業が胚胎されたといえよう.

シャノンは, キャンパスでは必ずしも目立つ学生ではなかったが, 男子学生友愛組織 (Fraternity) である $\Pi K \Phi$ (パイ・カップ・ファイ) と $\Sigma \chi$ (シグマ・カイ) の会員に選ばれているので, 決して平凡な学生ではなかったと思われる. アメリカ数学協会が発行する『アメリカ数学期刊 (American Mathematical Monthly)』を購入し, 数学パズルの解答投稿者として 1934 年の春に名前が初めて掲載された. このジャーナルは, 数学研究者を目指す学部学生から, より広い数学愛好者を対象に, 年に 10 回発行されていた. 重量感のある論文や書評が中心で, 投稿者の解答は後ろの方のページに小さく掲載される程度であったが, 自分の頭脳の成果で社会と繋がることを実感できる経験は新鮮であったに違いなく, 翌年にも投稿して再び掲載された.

1936 年の春, 20 歳で卒業の年を迎えたシャノンは, 家業の家具販売業を継ぐ意志は毛頭なく, 大学院へ進むことを当然の進路として考えていたが, どこの大学院へ進学するかについては迷っていた. ある日, 工学部の掲示板に張り出された告知を目にして, 突然, シャノンの新しい人生が始まることとなった. それは, MIT の電気工学科が, ヴァネバー・ブッシュ (Vannevar Bush) [34] が開発を手掛けていた有名なアナログコンピュータである微分解析機の仕事を, 大学院生としてパートタイムで手伝う研究助手を公募する告知であった. これは, 頭脳労働にも手作業にも興味をもつシャノンにとって, 理想的な仕事であった. シャノンは早速に応募したが, ブッシュには人を見る目があり, シャノンのその後の人生とアメリカ科学界の未来を拓く役割を担うこととなった.

4. ヴァネバー・ブッシュ: 工学研究者かつ起業家

ヴァネバー・ブッシュのアナログコンピュータ開発への取り組みは, 1913 年, 彼がタフツ・カレッジ (Tufts College, 1954 年に現在の Tufts University に改名) の 4 年生であったときにまでさかのぼる. 当時, タフツ・カレッジは学士号と修士号を 4 年間で同時に取得することを許していたが, ブッシュは修士論文の題材

にプロファイル・トレーサー (Profile Tracer) [12] を開発し、特許を取得した。この機械は測量器で、芝刈り機の刃があるはずの場所に空の箱が括り付けられている。箱の中には振り子がぶら下げられ、後部の車輪を動力とする円盤状の装置が取り付けられていた。円板には二つのローラーが乗せられていて、一つは垂直距離を測定してペンを走らせるためのもの、もう一つは水平距離を測定し、下に備え付けられたロール紙を回すためのものであった。この機械を押していくと、土地の地形がロール紙に断面図としてインクで描かれていく仕組みで、マンホールの凹凸を正確に捉えるほど精緻な出来映えであった。残念なことに、本人以外の誰も興味を示さず、この発明の成果は学士号と修士号の同時取得に留まった。捕鯨船団の船長であった曾祖父と祖父をもつこの若者は、短気で好戦的であったが、後にアメリカで最も影響力のある科学者の1人となる。

タフツ・カレッジを卒業後、ブッシュはGE(General Electric)で週給14ドルの検査工として働き始めた。検査技術に習熟すると工場へ派遣され、高圧変圧器の検査に携わるようになる。しかし、不運にもその工場が火災に遭い、ブッシュを含むすべての検査工は停職扱いとなった。1914年の10月にタフツ・カレッジに戻り、数学を教えた。翌年、クラーク大学(Clark University)から年額1,500ドルの奨学金を供与され、アーサー・ゴードン・ウェブスター(Arthur Gordon Webster)の博士課程学生となるが、ウェブスターが音響学に取り組むよう指示したので、その分野に興味のなかったブッシュは退学し、改めてMITの電気工学科の博士課程に入学する。結婚するため経済基盤を確立する必要のあったブッシュは、1916年の4月には「発信電流回路：一般化された角速度理論の拡張と結合回路、人工送電線への応用(Oscillating-Current Circuits: An Extension of the Theory of Generalized Angular Velocities, with Applications to the Coupled Circuit and the Artificial Transmission Line)」というタイトルの博士論文を提出した。指導教員であったアーサー・エドウィン・ケネリー(Arthur Edwin Kennelly)はさらなる研究が必要との判断を下したが、ブッシュは引き下らず、学部長裁定でMITとハーバード大学(Harvard University)の両大学から博士号を授与された。その年の8月には結婚し、後に2人の息子を授かった。

卒業後は、タフツ・カレッジで教鞭を執ったが、同時に、キャンパスから音楽放送を流すAmerican Radio and Research Corporation (AMRAD)の研究所の所

長となり、その給料はタフツ・カレッジを上回るものだった。1917年、アメリカ合衆国が第1次世界大戦に参加すると、全米研究評議会(National Research Council: NRC)に参加し、地球の磁場の乱れを読み取ることで潜水艦を発見するシステムの開発に取り組んだ。木造船からであればうまくいくところまでは漕ぎ着けたが、金属製の戦艦上では機能させることができなかった。

第1次大戦終了後、ブッシュはタフツ・カレッジを去りMITの電気工学科に移ったが、AMRADの研究所の所長職は続けた。しかし、第1次大戦以来の好条件は打ち切られたので、AMRADの技術者であったアル・スペンサー(Al Spencer)が勤務時間外に発明した温度スイッチ(thermostatic switch)で起業を計画する。AMRADの経営陣はその製品に興味をもたず、販売に関しても反対しなかったため、起業家として知られていたローレンス・マーシャル(Laurence K. Marshall)と弁護士のリチャード・アルドリッチ(Richard S. Aldrich)の協力を得てSpencer Thermostat Companyを設立、自らは技術顧問に収まった。新会社の年商は直ぐに100万ドルを超え、紆余曲折を経た後、Sensata Technologiesとして今日まで続いている。

1924年、ブッシュとマーシャルは、S-tubeと呼ばれる電圧を一定に維持する低電圧放電管の発明者である物理学者チャールズ・スミス(Charles G. Smith)とチームを結成する。これに先立つ1922年7月、マーシャルは無音冷蔵庫を製造するAmerican Appliance Companyを設立していた。しかし、従来のラジオが二つの異なる電源を必要とすることに比し、これを1本化できるS-tubeに魅せられ、ブッシュとスミスの協力を得て社名をRaytheon Companyに変更、本格的にS-tubeの製造・販売に乗り出した。この会社は急成長を遂げ、今日、電子機器の開発・製造を中心に防衛産業の一翼を担うまでの大企業となる。ブッシュが大きな財をなしたことはない。

5. 微分解析機の開発

1927年、ブッシュは本格的に微分解析機の開発に取り組み始めた。これはアナログコンピュータで、当初は、18独立変数までの1階微分方程式を解く機能をもっていたが、後には2階微分方程式にも対処できるようになった。

それまでのアナログコンピュータは、単一の目的を達成するために個別に考案された機械であった。問題となる物理世界の本質を単純化されたモデルとして表

現し、モデルを機能させるプロセスから骨組みを抽出してある種のミニチュアを作って出力させるもので、いってみれば原型のアナログ（類似物）であった。ブッシュの作成したプロファイル・トレーサーは、その先駆的な例の一つである。ほかに先行する重要な例としては、ウィリアム・トムソン (William Thomson) [35] の調和解析器とハンニバル・フォード (Hannibal Ford) [36] の積分器を挙げることができる。

19 世紀において、海洋潮汐を予測することは極めて重要であった。いつ入港し、どこで操業し、どのような航路を取れば良いかなどを決めるには、潮流に関する知識が不可欠であった。小さな漁船であれば経験や勘を頼りにすることも可能であったが、大きな鉄製の蒸気船には、もっと正確な情報が必要とされた。ここでトムソンが活用することを思いついたのは、19 世紀初頭の大きな数学的成果であるフーリエ解析であった。1807 年、ジャン・バティスト・ジョゼフ・フーリエ (Jean Baptiste Joseph Fourier) [37] が熱伝導に関する論文で明らかにしたもので、「任意の曲線は正弦波と余弦波の合成で表すことができる」と主張する内容であった。すなわち、任意の関数 $f(x)$ は、

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)\} \quad (5.1)$$

と書ける。

[註] 正確には、 $\int_0^{\infty} f(x)^2 dx < \infty$ であれば、

$$S_N(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \{a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)\}$$

に対して、

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} \{f(x) - S_N(x)\}^2 dx = 0$$

が成立するという内容が (5.1) 式の正しい解釈である。

1824 年、北アイルランドのベルファストに生まれたトムソンはケンブリッジ大学で学び、あらゆる物理的現象をエネルギーの観点から統一的に扱う数学モデルを体系化、この貢献は 17 世紀のニュートンの役割を 19 世紀の物理学界で果たすものとして評価された。特に、熱力学の分野で大きな貢献を成し、絶対温度計を開発した。また、何度か現場に赴き命の危険に晒される経験をしながら、世界で初めて大西洋に海底ケーブルを設置することにも重要な役割を果たした。1866 年、彼の科学的貢献に対してビクトリア女王から男爵位を授けられ、Baron Kelvin of Largs を名乗った。絶対温度の単位の名称であるケルビン、ここから採られ

ている。1907 年 12 月、母国スコットランドで 83 歳の生涯を終えた。

海洋潮汐を予測する問題に関するトムソンのアイデア [12] は、打ち寄せる波から潮汐表を記録してグラフ化することで (5.1) 式の左辺を作成し、それを入力情報として、機械的に主要な (a_n, b_n) を求めてフーリエ逆変換を得ることであった。すると、求めた係数を用いて改めて左辺を計算することができ、過去のデータから未来の波を生成することが可能となる。この潮汐予測機は、前半のフーリエ逆変換を計算する調和解析器と、その結果を用いてフーリエ級数を計算し、今後 1 年間の潮位レベルの予測をグラフとして出力する機械計算機から構成されていた。

調和解析器は細長く蓋のない木の箱で、8 本の脚に支えられ、内部からは鉄製のポイントと手動クランクが出ている。右手でポイントを用いてグラフをトレースしながら、左手でクランクを絶え間なく回すと、油を塗った歯車が箱の中で回転する。箱の内部では 11 個の歯車が異なるスピードで回転し、それぞれが無秩序に見える関数を構成する単純な関数の一つずつ特定していく。最後に、各ゲージには、平均潮位、月の引力、太陽の引力など、11 の小さな数字が表示される。調和解析器で読み取られた数字は、15 の滑車を持ち、衣裳部屋ほどの大きさをもつ機械計算機に入力され、ペンとインクによって翌年の潮位レベル予測グラフを作成していく。1876 年には、この潮汐予測機は今後 1 年間の推移に関する情報を引き出すために 4 時間を要したが、1881 年には 25 分までに短縮された。

この潮汐予測機は取り敢えず採用されたものの、長い間、埃を被ったままであった。その理由は、安定的な潮の流れに沿って入港するような環境では充分な実用性があったとしても、大型の戦艦が荒れ狂う海で敵艦を攻撃する砲弾の軌道を求めるような問題に対しては、全く無力だったからである。波による上下動、砲弾の軌道上の空気密度、地球の曲率、砲弾飛行中の地球の自転の影響といったさまざまな要因の影響を受けて、砲弾が命中するか海に落下するかが決まる。これらの要因の一つ一つは、微分方程式の変数であったり係数であったりするので、どうしても微分方程式の解を計算する必要があったのである。

トムソンの発明の欠陥を補う研究が本格化したのは、第 1 次世界大戦が始まってからであった。1916 年、デンマークのユトランド半島沖でイギリス海軍とドイツ海軍との海戦が戦われた。世に言う、ユトランド沖海戦である [12, 38]。第 1 次世界大戦における唯一の主

力艦隊同士による決戦であり、151 隻のイギリス艦隊と 99 隻のドイツ艦隊が砲撃を交わす最大の海戦となった。イギリス艦隊は物的に圧倒的な優位にあったが、1 艘を除き人間の目視で砲撃を行い、命中率は僅か 3%、11 艘の敵艦船を沈めるに留まった。一方、ドイツ艦隊は、イギリスに比べ射撃指揮に優れ命中率が高かった。また、過去の戦訓から砲弾火薬庫などの防御に細心の注意を払い、巡洋戦艦も防御力の強化を行っていた。さらに主力艦艇の主砲の最大仰角を引き上げ、射程距離を伸ばす工事を実施していた。これらは海戦で重要な意味をもち、イギリスはドイツよりも多大な艦船・人員の損失を蒙り、14 艘が沈没、6,000 人以上の命が失われた。これ以降、コストを掛けても、信頼性の高い方程式解読機を開発する必要性が認識されるようになった。

トムソンの研究の不足を補い、微分解析機の自動化へ向けて重要な一歩を記したのは、アメリカの発明家であり電気工学技術者であったフォードである。1877 年、ニューヨーク州の北部に位置するドライデン (Dryden) で生まれ、コーネル大学で電気工学を学んだ後、Elmer Ambrose Sperry's Sperry Gyroscope Company に勤務し、軍事用の方位測定器 (gyrocompass) の開発に貢献した。1915 年に Ford Instrument Company を起業し、1943 年に引退するまでに 50 以上の発明特許を獲得した。そのほとんどは、艦船からの砲撃の際に敵艦の方位と距離を算出するアナログコンピュータに関連したものであり、第 2 次大戦中、アメリカ海軍の艦隊に装備されて大いに威力を発揮した。1955 年、77 歳で他界した。

フォードの開発したアナログコンピュータの中で最も重要なものは、艦船からの砲撃制御用に開発された Ford Mark 1A Computer [39] である。艦橋高くに設置された砲撃指揮所において、望遠鏡とレーダーを用いて、標的までの距離、方位、高度をリアルタイムで把握し、回線を通じて Mark 1A へ入力する。Mark 1A 内部には、平らな回転盤の上に二つのボールベアリングが取り付けられていた。どちらも回転盤の表面を自由に動き続けるが、中心から離れるほどスピードは速くなる。中心からの距離は入力から生成される曲線によって定まり、ベアリングの回転速度が方程式の解に相当した。ボールベアリングと一緒に回転するシリンダが機械のほかの部分を作動させると、ベアリングのスピードに関する情報と、追加的に安定測定器から入力される艦船の回転、振動、速度と風速、風向が加味され、最終的に、標的までの距離、砲撃の方向、砲弾が空中を飛来する時間などが割り出され、さらに砲身

を向ける方向と角度を決定した後、その結果を砲手の下へ指示として伝える仕組みであった。

こうした機械を構想したのはフォードが最初ではなかったが、積分に関する信頼できる情報を提供する装置としては、極めて先駆的なものであった。艦船の乗組員は、その正確性を愛でて、Mark 1A を「パイパー・フォード」と呼んだ。後にブッシュは、Mark 1A について、「驚くほどの正確さと完成度だった」と語っている。しかし、Mark 1A は、あくまでもある特殊な問題の解を求めることに特化したアナログコンピュータであった。ブッシュは、六つのボールベアリングを駆使して積分器に改良を加え、砲身の方向や角度を決める問題だけではなく、電力網の設計、原子の形状や太陽の構造を探る研究にも使える高い汎用性をもつアナログコンピュータとして、微分解析機を開発することになる。

草創期のアナログコンピュータの構築に当たって、機械工と一緒に働いたブッシュは、手を動かすことで微分法を学ぶことができると思うようになっていた。「機械工は、理論を正式に理解しているわけではないが、基本は把握している。積分器を回したり歯車を動かしたりしながら、機械の視点から学び、微分の内容を自然に身に付けているんだよ」と述懐している。この考え方は、ブッシュの大学院学生の指導方法の基本となり、シャノンもその恩恵を受けることになる。

微分解析機の重要な要素である積分器の改良に貢献したのは、ブッシュの修士学生であったハーバート・スチュアート (Herbert R. Stewart) であった。1925 年、ブッシュの指導の下に、その改良版微分解析機を用いて 1 階微分方程式を解く微分解析機を開発した。さらに、別の大学院生であるハロルド・ロック・ハゼン (Harold Locke Hazen) が、やはりブッシュの指導により、スチュアートの微分解析機を 2 階微分方程式も解ける形に拡張した。特に、スチュアートの微分解析機が純然たる機械式計算機であったのに比べ、ハゼンのそれは電気機械式計算機となっていたのが特徴である。

ハゼンの微分解析機の仕組みの概要は、以下のようである [12]。入力部分の端には六つの作業用テーブルが設置され、そこで入力となる方程式を機械に読み取らせる。トムソンの調和解析器が潮汐グラフを読み取らせるのと似ていて、オペレーターが手動クランクを回すと、方程式の手書きのグラフ上のポイントが作動して解析を始める。たとえば、原子による電子の散乱について計算するためには、原子場のポテンシャル関数と、原子の中心からの距離との関係に関する情報を入力する必要がある。方程式の詳細は、微分方程式の変数に

対応するシャフトに伝えられ、その値の大小が、大きければ速くといった具合に、シャフトの回転速度によって表現される。すると今度は、微分解析機がフォードの積分器のように作動する。回転する水平の円盤の上にはホイールが直角に接しており、ディスクの中心から離れているほどホイールのスピードは速くなる。このホイールは、さらに五つの同じ構造をもつ解析機と接続されていて、どの解析機でもホイールが回転するとグラフの巻紙が解かれてゆき、その上で鉛筆が上下動を繰り返す。こうして求める式がグラフに表わされ、それがまた入力となり、そうして機械は何日も、ときには何ヶ月も回り続け、最後に求める解のグラフが完成するのである。この研究で、ハゼンは 1929 年に修士号、1931 年に博士号を取得している。

これらのコンピュータが登場した当時、デジタル革命は始まっておらず、解を求めるプロセスでは、現実の動きを支配する方程式を、機械が文字どおりなぞっていた。ブッシュは、次のように語っている [12]。

「これは、アナログの機械だ。たとえば、これから建設する橋が突風の中でどのように揺れるかを知りたいければ、機械的な要素と電気的な要素を組み合わせ、本物の橋と全く同じ動きをさせなければならない。どちらの要素も、同じ微分方程式に従わなければならない。」

物理学者にとっても工学技術者にとっても、現実と微分解析機の中の二つのシステムは、同じシステムに従う類似性（アナロジー）を備えている。アナログという言葉には、そうした意味が込められている。デジタル時計は、時間に沿って数字が変化していくシステムで、全く太陽を連想させないが、アナログ時計では、文字盤の上を針が移動して時を示し、これが日時計との類似性を保持している。

6. ブッシュとシャノンの出会い

アルゴリズムを機械によって実行するためには、以下の三つの難関があることを指摘した（連載第 13 回）。〈第 1 の難関〉

アルゴリズムで明示されている論理を、機械的な操作の連鎖として表現できるような言語に翻訳すること

〈第 2 の難関〉

そのような言語で記述されたアルゴリズムを、実際に実行できる物理的仕組みを開発すること、すなわち、必要な入力を与えると結果を出力する具体的な仕組みを実現すること

〈第 3 の難関〉

第 2 の難関までを克服できたとしても、個別的なアルゴリズムに対応して、その都度、個別的な物理的仕組みを用意していたのでは、著しく利便性が損なわれる：どんなアルゴリズムでも実行できる汎用性を備えた物理的仕組みを開発すること

ブッシュ研究室が開発したアナログコンピュータとしての微分解析機は、方程式をグラフで表現し、それをなぞって読み込ませることで第 1 の難関を克服した。第 2 の難関は、微分方程式の表わす動きを、シャフト、円盤、歯車といった道具を用いて機械的になぞり、最終的に解として求める動きを再びグラフとして出力することで突破した。第 3 の難関については、それ以前のアナログコンピュータに比べて、微分方程式で表現できる問題であれば、どんな問題であっても対応できるという点で飛躍的に汎用性を高めてはいた。しかし、新しい方程式に取り組むたびに解体し、組み立て直さなければならないという点で著しく利便性に欠け、第 3 の難関を十全には克服できていなかった。

シャノンが微分解析機の研究に参加した 1936 年の秋、ブッシュ研究室はこの限界に突き当たっていた。ブッシュは、当然、自動的に解体と組み立てが実行される微分解析機を構想していた。自動制御機能を備え、連続的に異なる微分方程式を次々に解き続け、関連する複数の方程式を同時に解くことができるような機械である。そこでは、ネジ回しを用いる物理的な解体と組み立てを、電気回路と開閉器が代替する筈であった。それには大規模な投資が必要であったが、大恐慌の余波で MIT の予算は減額されており、難しい状況にあった。朗報は、民間のロックフェラー財団の慈善家から届いた。次世代コンピュータの開発用にと、265,000 ドルの寄付が寄せられたのである。停滞を打破するために必要な研究資金を得て、自動制御機能をもつ微分解析機の開発という高度で難解な作業を、ブッシュは新入生であるシャノンに任せた。シャノンの素質を見抜いたことはもちろん、ブッシュのシャノンに対する期待が、いかに高かったかの表れであろう。

MIT の設立は 1861 年であるが、設立された年の 4 月に南北戦争が勃発し、北軍の勝利で終わった 1865 年まで、授業を行うことができなかった。欧州の科学技術専門大学を手本に、応用科学と工学を中心に、実験を通して学ぶカリキュラムに重きを置いたが、MIT は「チャールズ川沿いの上流に在るハーバード大学と遜色ない、純粋科学の追究の場とすることが最低条件だ」と主張するグループと、「産業分野における最高の研

究を目指し、効率を優先すべし」とするグループとに二分されていた。筆者は1980年、電気工学研究科の客員研究員として1年間をMITで過ごした経験がある。キャンパスはそれほど広くなく、円柱のファサードにはアルキメデス、ニュートン、ダーウィンといった偉人の名前が刻まれており、中心にはパンテオン形式のドームが聳えていた。産業を支える存在であることを追求しながら純粋な科学の探求も目指すMITには、ハーバード大学にはない、工場とアカデミズムの要素を兼ね備えた独特の雰囲気があった。頭脳労働にも手を動かして実際にモノを造ることに興味をもつシャノンにとっては、ぴったりの環境であったといえよう。機能性を重んじる学風からか、校舎は名前ではなく番号で呼ばれ、自動制御機能をもつ微分解析機の開発に取り組んだシャノンが拠点としたのは、第13校舎であった。（この項、なお続く）

参考文献

- [1] H. Goldstone, *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton University Press, 1972. (末包良太, 米口肇, 犬伏茂之訳, 『復刊 計算機の歴史—パスカルからノイマンまで—』, 共立出版, 2016.)
- [2] S. McCartney, *The Triumphs and Tragedies of the World's First Computer*, Walker, 1999. (日暮雅通訳, 『エニアクー世界最初のコンピュータ開発秘話—, パーソナルメディア, 2001.)
- [3] 坂村健, 『痛快! コンピュータ学』, 集英社, 1999 (文庫版 2002).
- [4] 竹内伸, 『実物でたどるコンピュータの歴史—石ころからリングへ—』, 東京理科大学出版センター (編), 東京書籍, 2012.
- [5] 小田徹, 『コンピュータ開発のはてしない物語—起源から驚きの近未来まで—』, 技術評論社, 2016.
- [6] Wikipedia, Francois Viète, https://en.wikipedia.org/wiki/Francois_Viète (2021年12月14日閲覧)
- [7] E. T. Bell, *Men of Mathematics Volume 1*, Simon & Schuster, 1937. (田中勇・銀林浩訳, 『数学をつくった人びと上』, 東京図書, 1976.)
- [8] Wikipedia, René Descartes, https://en.wikipedia.org/wiki/René_Descartes (2021年12月21日閲覧)
- [9] E. T. Bell, *Men of Mathematics Volume 2*, Simon & Schuster, 1937. (田中勇・銀林浩訳, 『数学をつくった人びと下』, 東京図書, 1976.)
- [10] Wikipedia, George Boole, https://en.wikipedia.org/wiki/George_Boole (2021年12月14日閲覧)
- [11] P. J. Nahin, *The Logician and the Engineer: How George Boole and Claude Shannon Created the Information Age*, Princeton University Press, 2012. (松浦俊輔訳, 『0と1の話—ブール代数とシャノン理論—』, 青土社, 2013.)
- [12] J. Soni and R. Goodman, *A Mind at Play: How Claude Shannon Invented the Information Age*, Simon & Schuster, 2017. (小坂恵理訳, 『クロード・シャノン—情報時代を発明した男—』, 筑摩書房, 2019.)
- [13] Wikipedia, Claude Shannon, https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon (2021年12月20日閲覧)
- [14] Wikipedia, Alan Turing, https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing (2021年12月20日閲覧)
- [15] B. J. Copeland, *Turing: Pioneer of the Information Age*, Oxford University Press, 2012. (服部桂訳, 『チューリング—情報時代のバイオニア—』, NTT 出版, 2013.)
- [16] A. Hodges, *Alan Turing: The Enigma*, Princeton University Press, 2014. (土屋俊・土屋希和子訳, 『エニグマー—アラン・チューリング伝—』, 勁草書房, 2015.)
- [17] 高岡詠子, 『チューリングの計算理論入門—チューリング・マシンからコンピュータへ—』, 講談社, 2014.
- [18] Wikipedia, Galileo Galilei, https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei (2021年12月21日閲覧)
- [19] Wikipedia, Nicolaus Copernicus, https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Copernicus (2021年12月21日閲覧)
- [20] Wikipedia, Marin Mersenne, https://en.wikipedia.org/wiki/Marin_Mersenne (2021年12月21日閲覧)
- [21] Wikipedia, Isaac Beeckman, https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Beeckman (2022年1月2日閲覧)
- [22] Wikipedia, Adrien Baillet, https://en.wikipedia.org/wiki/Adrien_Baillet (2022年1月2日閲覧)
- [23] Wikipedia, Elisabeth of the Palatinate, https://en.wikipedia.org/wiki/Elisabeth_of_the_Palatinate (2022年1月2日閲覧)
- [24] Wikipedia, エリーザベト・フォン・デア・ブファルツ (1618-1680), [https://ja.wikipedia.org/wiki/エリーザベト・フォン・デア・ブファルツ_\(1618-1680\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/エリーザベト・フォン・デア・ブファルツ_(1618-1680)) (2022年1月2日閲覧)
- [25] 有賀暢迪, “合理力学の一例としての衝突理論 1720–1730年”, 科学哲学科学史研究, **6**, pp. 17–37, 2012.
- [26] Wikipedia, ソディの6球連鎖, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ソディの6球連鎖> (2022年1月4日閲覧)
- [27] Wikipedia, Thorold Gosset, https://en.wikipedia.org/wiki/Thorold_Gosset (2022年1月4日閲覧)
- [28] 寒川町ガイド, <https://samukawaguide.blogspot.com/2019/12/6.html> (2022年1月4日閲覧)
- [29] Wikipedia, Gottfried Wilhelm Leibniz, https://en.wikipedia.org/wiki/Gottfried_Wilhelm_Leibniz (2022年1月4日閲覧)
- [30] Wikipedia, Christina, Queen of Sweden, https://en.wikipedia.org/wiki/Christina,_Queen_of_Sweden (2022年1月4日閲覧)
- [31] Wikipedia, Isaac Newton, https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton (2022年1月4日閲覧)
- [32] 向井茂, “不変式の話”, 数学セミナー連載, 2005年12月号, 2006年1, 2, 4月号.
- [33] 日本医学会ホームページ, <https://jams.med.or.jp/news/013.html> (2022年2月4日閲覧)
- [34] Wikipedia, Vannevar Bush, https://en.wikipedia.org/wiki/Vannevar_Bush (2022年2月25日閲覧)
- [35] Britanica, William-Thomson-Baron-Kelvin, <https://www.britannica.com/biography/William-Thomson-Baron-Kelvin> (2022年3月6日閲覧)
- [36] Wikipedia, Hannibal Ford, https://en.wikipedia.org/wiki/Hannibal_Ford (2022年3月6日閲覧)
- [37] Wikipedia, Joseph Fourier, https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier (2022年3月6日閲覧)
- [38] Wikipedia, ユトランド沖海戦, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ユトランド沖海戦> (2022年3月6日閲覧)
- [39] Wikipedia, Mark I Fire Control Computer, https://en.wikipedia.org/wiki/Mark_I_Fire_Control_Computer (2022年3月7日閲覧)