

世界をORする視線 (7)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(3) コンピュータの発展：計算機械の時代

住田 潮

1. 計算道具の時代から計算機械の時代へ

前回、人間がモノを数えるという共通の能力を有する事実から出発し、計数・商取引を記録する時代を経て、大規模な計算を行うために道具を用いるようになるまでを追った。そろばんと算木は、計算の過程をそのまま道具に移すことにより、人間の負担を軽くすることが狙いであったが、ネイピアの骨になると、大規模計算を1桁の足し算に分解して実行するという工夫が入り、さらに計算尺では、対数の概念に基づき、掛け算を足し算に変換、さらにその結果を逆変換することで求める結果を得る、という1:1関数理論を援用するまでになった。そろばん、算木とネイピアの骨はデジタル計算道具であるが、計算尺はアナログ計算道具であることを注意しておく。

計算道具の時代においては、道具を用いても計算は人間の手で行う必要があった。本稿では、入力と演算操作を行いさえすれば、機械が代行して計算そのものを実行する計算機械の時代を俯瞰する。主たる参考文献は前回と同様であり、文献 [1-5] に列挙しておく。

2. 計算機械の時代 (シッカルト計算機)

世界で初めて計算機械を開発したのは、1642年、かの有名なブレイズ・パスカル (Blaise Pascal) [6] であると長らく信じられてきた。しかし、1718年、天文学者のヨハネス・ケプラー (Johannes Kepler) の伝記研究者であるマイケル・ゴットリーブ・ハンシュ (Michael Gottlieb Hansch) が、1623年と1624年にラテン語で書かれたヴィルヘルム・シッカルト (Wilhelm Schickard) [7] からケプラー宛の2通の手紙を発見したと発表、手紙にはシッカルトの計算機械の構

想が書かれていたため、世界で最初の計算機械発明者としてのパスカルの功績に対する疑義が生じた。その後、シッカルトの時代から300年以上の時を隔てて、1957年、やはりケプラーの伝記研究者であるフランツ・ハンマー (Franz Hammer) が、その2通の手紙に書かれた計算機械の素描がパスカルの発明よりも20年先行していると宣言し、現在では、世界で初めて計算機械を発明したのはシッカルトであるという説が一般的となっている。

シッカルトは、1592年、ドイツ西南部のヘレンベルクという小さな町で大工棟梁の息子として生まれた。早熟の天才としてテュービンゲン大学 (University of Tübingen) で学び、1609年、17歳で学士号、2年後の1611年には修士号を修め、さらに1613年まで同大学で神学と東洋言語を学んだ後、ルター派の宣教師となった。1617年、25歳のとき、同じ大学を1594年に卒業したケプラーの知己を得て親しく交わるようになり、その関係は1630年のケプラーの死まで続いた。1619年に教授として母校に戻ったシッカルトは、数学を含む科学全般に興味を示し、聖書言語学、ヘブライ語、天文学などを教えた。

1621年、ケプラーの月の軌道計算を助けるため、シッカルトは歯車を用いた計算機械の開発に着手する。前述したように、ハンマーが発見した1623年と1624年に書かれたケプラー宛の手紙の中で、手書きで描いた計算機のイメージ図と機械職人への作業指示図など、計算機の構造をかなり詳しく記している。6桁の数の計算を行うことが可能で、全体は、加算装置、ネイピアの骨を取り込んだ乗算装置、および中間結果を記録する装置の3層で構成され、1桁ごとに、入力用歯車、表示用歯車、中間結果保存用歯車を用い、これらの歯車を格子上で交錯させる仕組みであった。さらに6桁を超えるオーバーフローが発生すると、ベルを鳴らして知らせる工夫も組み込まれていた。大きさはタイプライター

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

より少し大き目で、時計用の固い金属製の歯車を使用して、手動の負荷に耐えるように設計されていた。シッカルト自身はこの計算機を『計算機構 (arithmeticum organum)』と名付けたが、当時の人々が『計算する時計 (Rechenuhr)』と呼んだことにも一理ある。

シッカルトは、試作品として自分用に制作したものと、その成功に基づいてケプラー用に準備したものの、計2台を制作したと思われるが、後者は完成前に火事で焼失した。中央ヨーロッパでは、1618年から1648年まで、プロテスタントとカトリックの宗教戦争である30年戦争が戦われたが、自分用に制作したものも、30年戦争のさなか、シッカルト一家の暮らした家と共に消滅してしまった。したがって、シッカルトの制作した計算機械は現存していない。

ケプラーやシッカルトが学んだテュービンゲン大学の教授であったブルーノ・フォン・フライターク・レーングホッフ (Bruno von Freytag-Löringhof) は、1957年、シッカルトからケプラーへの2通の手紙の内容を手掛かりに、シッカルト計算機の復元に挑んだ。内容が不明である部分は独自の工夫で補い、4年の歳月を掛けて、1960年にそれを完成させ、シッカルト計算機が実際に機能することを実証した。この複製は、現在、アメリカのモンタナ州ボーズマンにあるアメリカコンピュータ博物館に保存されている。

シッカルトは30年戦争のもたらした疫病ペストに罹患し、1635年、43歳の若さで世を去った。

3. 計算機械の時代 (パスカル計算機)

シッカルトに遅れること20年、現存する世界で最古の計算機械を開発したのは、数学者、物理学者、そして哲学者としても世界的に名高いパスカルで、1642年のことであった。シッカルト計算機は、当時、既に消滅しており、パスカルはその影響を全く受けずに、独自に計算機を完成させたと信じられている。

パスカルは1623年、フランス中部のクレルモンに生まれた。父親は徴税を職務とする行政官で、自然哲学や科学全般に関する幅広い教養を身に付けており、パスカルは彼から家庭内教育を受けた。教育熱心な父親は、1631年、パスカルが8歳のときに、当時、学問と文化の中心であったパリへ一家を引き連れて移住し、自宅を、当時の一流の数学者や科学者が頻繁に出入りするサロンとして提供した。パスカルはそうした大人の集いにも顔を出し、さまざまな知識を吸収することによってその才能を本格的に開花させ、まだ10歳にもならないときに、1から n までの和が $n(n+1)/2$ と

なることを自力で証明したと伝えられている。

パスカルの数学への強い関心が、文法規則に例外の多いラテン語やギリシャ語の学習に悪影響を及ぼすことを恐れた父親は、いくらせがまれても数学を一切教えず、数学関連の書物を隠してしまうほどの徹底ぶりであった。しかし、パスカルが12歳のとき、休み時間に遊んでいる部屋の床に炭でさまざまな図形を描きながら、ユークリッドの原論に書かれている「三角形の内角の和は2直角に等しい」という命題を自力で証明しているのを目の当たりにして、これ以上パスカルの才能を拘束するのは適切ではないと判断し、パスカルが休み時間に数学関連の書物を読むことを許すことに方針転換した。

こうした環境の中でパスカルの天才ぶりには磨きが掛かり、14歳のときには、一流の自然科学者たちが集まる民間の学会メルセンヌ・アカデミー (後の王立科学アカデミー) への出席を父親と共に許された。1640年、16歳で『円錐曲線論』を発表、この論文は射影幾何学における『パスカルの定理』を含んでおり、「アルキメデス以来の業績」と賞賛された。

この年、父親はノルマンディー地方の首都ルーアンの勅任租税・人頭税徴税官に任命され、一家はルーアンへ移住する。各教区への税の割当や徴収の仕事は膨大かつ面倒な計算を必要とし、夜中の2時前に就寝することのない父親の激務ぶりを目にしたパスカルは、17歳のときに、父親の計算負担を軽減しようと計算機の開発を構想し、設計・制作に着手する。しかし、この仕事は、その後、10年もの長きにわたってパスカルを苦しめ、結果として彼の寿命を縮めることになることは、想像もしなかったに違いない。

ルーアンは時計産業が盛んで、計算機に必要な部品の製作を頼める職人は何人もいたが、彼らに機械の仕組みを理解して貰うのが一苦勞で、パスカルは絶えず製造現場に足を運び進捗を確認する必要があった。さらに、出来上がった多数の部品を組み立てる作業は微妙な調整を必要とし、つきっきりで指導しなければならず、これがパスカルには絶大な苦痛であった。

2年間にわたる苦闘の末、1642年、試作品の第1号を完成させたが、それは満足できる品質からはほど遠く、さらに改良に取り組む必要があった。何とか使用に耐える水準に達したのは1645年、パスカルが22歳のときであった。その後も改良の努力を重ね、試作品の完成から10年の長きにわたり、6桁用、8桁用、10桁用の計算機を50台以上完成、これをパスカリーヌ (Pascaline) と命名した。この実物は、パスカルの生地クレ

ルモンにあるランケ博物館、パリのフランス国立工芸院、ドイツのドレスデンにあるツヴィンガー美術館など、世界各地で10台が完全な形で保管されている。文献[4]には8桁用、文献[5]には10桁用のパスカリースの写真が掲載されている。

パスカリースは、シッカルト計算機と同様に歯車の原理を応用しており、本質的には加算用であった。8桁用に作られた計算機は、幅36cm、高さ8cm、奥行き13cmの四角い木箱に収められており、箱の上面は、各桁を表す8個のダイヤルとそれに対応する8個の数字表示用の小窓が並ぶ操作盤となっていた。ダイヤルを1回転回すと表示板の数字が一つ増加する仕組みで、桁上がりの場合には、小窓の数字が9から0へと変化すると同時に、隣の小窓の数字を一つ増加させる工夫が組み込まれていた。たとえば、 $362 + 59$ という計算を行う場合、まず、右から3桁目までのダイヤルを回転させて362が小窓に現れるようにし、2桁目までのダイヤルを右からそれぞれ9回、5回と回転させると、小窓に421という答えが並ぶことになる。

減算は、10と9の補数を用いて行われた。1桁目の小窓には、実際は、00, 19, …, 82, 91という具合に10の補数をなす二つの数字が2段に並べられ、2桁目以上の小窓には、09, 18, …, 81, 90, と9の補数が2段に並べられた。加算には上側の数字を用い、使用しない段の数字は隠されるように工夫されていた。引く数が n 桁の減算を行う場合には、一般的に成立する $a - b = a + (10^n - b) - 10^n$ という式に基づいて、引く数を下段の数字に置き換えて加算し、最後に $n + 1$ 桁目の小窓から1を引くことによって答えを得た。たとえば、 $623 - 26$ という計算を行うとすると、まず小窓の上段の数字を用いて623を設定、次いで、26に対応する下段の数字を用いて74を加算し、その結果697の右から $n + 1 = 3$ 番目の小窓の数字6から1を引いて、答え597を求めたのである。

この補数を活用した減算法は、一見、面倒なようでもあるが、ダイヤルの逆回転を導入して減算を行う装置を開発するよりはずっと理に適っており、実際、現代コンピュータも、 $a - b = a + (2^n - b) - 2^n$ という同様の原理に基づいて2進法の減算を実行している。すなわち、引く数の0と1のビット・パターンを逆転させたうえで最後の桁に1を加え、その結果を引かれる数に加えて $n + 1$ 桁目から1を引いて減算を行っている。たとえば、 $18 - 9 = 9$ という計算であれば、9の2進数表示101のビット・パターンを逆転させて010、この末桁に1を加えて011、これを18の2進数表示

1010に加えると1101、この場合 $n = 3$ であるから、4桁目から1を引いて0101すなわち9を得る。

パスカリースは、歯車といいながら実は円盤に10本のピンを等角度で押し込んだピン歯車と呼ばれる代物を用い、操作盤のダイヤルに対応する水平ピン歯車に、桁上がり機能を担う垂直ピン歯車を噛み合わせる仕組みであった。この構造の致命的欠陥は、当時の技術では摩擦抵抗の累積を克服することができず、 $9,999,999 + 1$ のように桁上がりが一斉に発生すると、ピン歯車が重くなり動かなくなってしまう点にあった。この弱点を段付き歯車の開発によって克服したのは、ゴットフリート・ヴィルヘルム・ライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz) [8] で、1672年のことである。

パスカルの業績は、数学、物理学、神学から自然哲学へと広範囲にわたる。パスカルの三角形、サイクロイドの求積問題、流体の平衡に関するパスカルの定理など、今日、理系の大学で教えられるいくつもの重要な定理を証明し、その功績から、圧力の単位としてその名を残している。また、確率論の分野でも、重要な貢献をしている。

1654年、パスカルは、共通の友人を介して、フランスの裁判官で数論の父と呼ばれる数学者でもあったピエール・ド・フェルマー (Pierre de Fermat) [9] の知己を得て、賭博に関する考察に関して文通を始めた。問題は、賭博ゲームを行っていた2人のプレイヤーが、双方ともゲームを中断することに同意した場合、その時点までのゲームの状況と、今後、それぞれがゲームに勝つかも知れない蓋然性を考慮して、テーブルに残された賭け金をいかに公平に分割するか、というものであった。この文通を通して、数学史上初めて『期待値』という概念が導入され、さらに、ここで展開された確率演算は、ライプニッツに受け継がれて精緻化されることになる。

パスカルは実業家としての才能もあり、富裕貴族だけが馬車を所有することが一般的であった時代に、今日のバスに当たる乗合馬車を着想し、実際、1662年にパリで創業した。しかし、この創業の6ヶ月後に、かねて弱っていた体調がいよいよ悪化し、39歳の短い生涯を閉じた。晩年のパスカルは、信仰について深く考察するようになり、キリスト教を擁護する書物の執筆に着手し、多くの思索ノートを残したが、自力で完成させることは叶わず、彼の死後、整理され、『パンセ』として出版された。

『パンセ』は深い思索の痕跡を残しており、「人間はひとくきの輩にすぎない。自然のなかで最も弱いもの

である。だが、それは考える輩である。…人間は彼を殺すものより尊いだろう。なぜなら、彼は自分が死ぬることと、宇宙の自分に対する優勢とを知っているからである。宇宙は何も知らない。」という言葉に象徴されるように、後世の多くの人々に多大な影響を与えた。また、神の存在は哲学的に（論理的に）証明できる次元のものではないと考え、同時代のルネ・デカルトが行った証明などを含め哲学的な神の存在証明の方法論を否定したが、自らの確率論を援用して、「神の存在は証明できなくとも、神を信仰することは、しないことより優位である」ことを示した。この立論は、今日、『パスカルの賭け』として知られている。

4. 計算機械の時代（ライプニッツ計算機）

シカルト計算機はケプラーの月の軌道計算を助けることを目的とし、パスカル計算機は、徴税官の仕事で必要となる煩雑な計算に追われた父親の労力を軽減するために開発された。これらの現実的な必要性に裏打ちされた開発意図に比べ、ライプニッツが計算機械の開発を志した理由は、天才として常に社会的名声を得ることを追求した彼の個性に深く根ざしている。

ライプニッツは、1646年、ドイツのライプツィヒに生まれた。父親はライプツィヒ大学（Universität Leipzig）の哲学教授で法律家でもあったが、ライプニッツは50歳を超えてから生まれた子であったので、彼が6歳のときに病没してしまう。その亡き父親の書齋に入り浸り、10歳になるまでに、ヘロドトス、プラトン、アリストテレス、キケロなどの著作を独力で読破し、早熟の天才として早くから評判を呼んだと伝えられている。

8歳でラテン語を身に付け、13歳のときにはラテン語で詩を書くことができたという。1661年、15歳でライプツィヒ大学に入学し、法律、哲学、数学を学んだ。大学の講義に飽き足らず、探究心の導くまま、ケプラーやガリレイなどの新しい自然科学を独力で学び始めたのもこの頃である。1663年、16歳のときに哲学の学士論文を提出して卒業、大学院に進学したが、翌年の1664年、17歳の若さで哲学修士号を修めている。

ライプニッツの次なる目標は、法学博士となることであった。当時、博士号を取得するには3年間の博士教育を受けることが一般的であったが、1666年、20歳のときにライプツィヒ大学に博士論文を提出した。しかし、論文の内容に言及することなく、若すぎるという理由で拒否された。古参の教授昇格を目指す博士候補者たちが、ライプニッツの才能を妬んで教授陣へ働

きかけた裏工作の結果である、という説もある。

失望したライプニッツはライプツィヒを去り、ニュルンベルク郊外にあるアルトドロフ大学（Universität Altdorf）に移り、翌年、優秀な成績で法学博士の学位を取得した。この大学で法学教授の職を提供されたが、もっと広い世界へ飛躍することを熱望してこの申し出を断り、親戚が最長老として在籍していたニュルンベルクの錬金術の結社「ローゼンクロイツェル（Rosenkreuz：薔薇十字団）」に秘書として勤務、化学知識の習得に努めた。

ライプニッツは、この組織を僅か半年余りで去ることになるが、そのきっかけはヨハン・クリスティアン・フォン・ボイネブルク（Johann Christian von Boyneburg）男爵の知遇を得たことにあった。ボイネブルクはマインツ侯国の首相を務めたこともある人物で、幅広い教養を備え、22歳の若きライプニッツの優れた才能を即座に見抜いた。ライプニッツは、ボイネブルクによって、神聖ローマ帝国の君主に対する選挙権（選定権）を有する選定侯であったヨハン・フィリップ・フォン・シェーンブルン（Johann Philipp von Schönbrunn）に推挙され、マインツの宮廷に仕えることになる。瞬く間にシェーンブルンの信頼を勝ち得たライプニッツは、重用されるようになり、数ヶ月の間に洗練された外交官になりきっていた。これ以降、ライプニッツは、研究者としてさまざまな分野で業績を上げると同時に、社会的な場に身を置いて活躍するようになる。

当時のドイツは、30年戦争の傷跡が未だ深く残っている状態であった。ドイツ人口の20%を含む800万人以上の死者を出したこの戦争の終結後も、プロテスタントとカトリックの間の根深い争いは継続していた。さらに、この戦争によって全ヨーロッパの勢力分布が不均衡化し、隣国フランスではルイ14世の絶対王政が花を咲かせる一方、ドイツは著しく弱体化し、フランスの脅威に晒される状況にあった。

こうした苦境を打開するため、ライプニッツはボイネブルクと共に、「エジプト計画」を立案した。フランスにエジプト遠征の利を説いてこれを勧め、それによってドイツに対するルイ14世の矛先を躲すことを意図するものであった。1672年、26歳となったライプニッツは、「エジプト計画」をルイ14世に献策するため、パリに派遣された。しかし、パリ到着後間もなく、最大の理解者であったボイネブルクとシェーンブルンが相次いで他界し、強力な後ろ盾を失ったライプニッツは、ルイ14世に謁見することも叶わず、「エジプト計画」は挫折した。

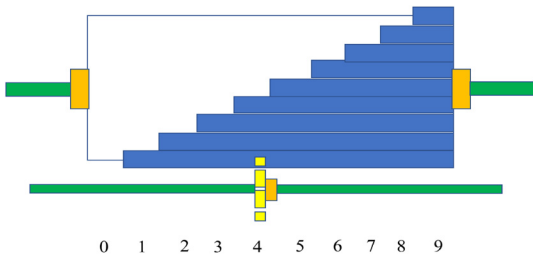


図1 段付き歯車

哲学や数学を中心とする学問のうえでも、文化のうえでも、当時のパリは世界の中心であった。この魅力溢れる街に惹かれたライプニッツは、1676年10月までの4年半の間、パリに留まった。デカルトやスピノザの著作を読み、オランダの高名な数学者、物理学者、天文学者でもあったクリスティアン・ホイヘンス (Christiaan Huygens) の知遇を得て近代数学への扉を開き、その後、数学の研究に没頭するようになる。後述する微分積分学の確立は、彼のパリ滞在中の最大の成果である。

社会的に認められることに強い執着をもつライプニッツは、パリ滞在中に、フランス科学アカデミーに外国人として華々しくデビューする野望を抱いた。パリの学会にデビューするには、何かしらの手土産が必要となることを耳にし、ここで計算機制作を思い立ったのである。パスカル計算機を詳しく研究し、1672年12月には未完成ながら第1号試作機を制作、1673年1月にマインツ選定侯のイギリス使節団に同行して渡英した折、ロンドン王立協会に立ち寄って未完成のまま試作品を披露し、注目を浴びた。

パスカル計算機ではピン歯車が用いられたのに比し、ライプニッツ計算機の特徴は、段付き歯車を導入した点にある。幅広の歯車に、長さの異なる歯を段階的に変化させて刻み込み、幅の狭い10個の歯を刻みつけた歯車の位置をずらして噛み合わせることにより、後者の回転角度を調節できるように工夫したのである。図1に示すように、下の歯車を上の歯車の歯が n 個刻まれている位置に合せると、上の歯車が1回転することにより下の歯車が $(36 \times n)^\circ$ 回転し、対応する表示窓に n が現れる。この図では、 $n = 4$ である。

ライプニッツ計算機は、加減算を手動で完全に行えるうえに、乗算と除算も、それぞれ加算と減算の繰り返しによって実行可能であり、耐久性にも優れ、パスカル計算機よりも多くの点で進んでいたが、10進数の桁上がり動作に関しては、未だ不十分であり、量産による商品化に至ることはなかった。

1675年、ライプニッツはフランス科学アカデミーの外国人名誉会員となるべく画策したが、既に多くの外国人名誉会員が存在するという理由で不調に終わる。ほかの就職活動でも満足できる結果を得られず、1676年、ヨハン・フリードリヒ・フォン・ブラウンシュバイク (Johann Friedrich von Braunschweig) 侯の招きを受け入れ、ハノーバー宮廷の顧問官兼図書館長となるべくパリを去り、ハノーバーに移住した。以後、その死まで40年間の長きにわたって、ハノーバー宮廷に仕えることとなる。

1714年、当初からライプニッツを支援していた選帝侯妃ゾフィー (Sophie) が死去すると、息子の選帝侯ゲオルク・ルートヴィヒ (Georg Ludwig) がイギリス国王を兼任、ジョージ1世 (George I) としてイギリスに移住することになった。しかし、ジョージ1世はライプニッツを煙たく思っていたのでイギリスに連れて行くことはせず、ハノーバーに残された。これ以後、ライプニッツは政治的な支援者を失い、周囲の空気は冷たくなる。晩年のライプニッツは、侯家の家史編纂というつまらない仕事に携わり、ほかには自分を理解してくれる外国の学者や友人と広く文通をかかわすだけで、決して恵まれたものではなかった。生涯独身を通したライプニッツは、1716年、70年の生涯を終えた。

ライプニッツの業績は、極めて多岐にわたる。哲学においては、「モノドは自然における真のアトム (= 不可分なるもの) であり、これが宇宙における真の存在者である」という前提に立つ『モノドロジー (单子論)』を確立した。図書館のカタログ・システムを案出したのもライプニッツで、今日の図書館学に受け継がれている。また1700年にはベルリンに招かれ、ベルリン科学アカデミーの設立に尽力、初代会長に就任した。さらに実学の面でもその才能を発揮し、年金額の算出や国債の価格計算の確立にも寄与している。

数学の分野での貢献は、特に異彩を放っている。関数の概念は三角関数や対数関数の分野で陰に取り扱われていたが、曲線から得られる幾何学的概念を、世界で初めて横軸、縦軸、接線、弦といった名称を用いて記述し、1692年と1694年の論文で発表している。また、幾何学の命題を代数的に証明する構想も得ていた。

線型方程式の研究においては、今日でも使われる行列の記法を編み出し、解が存在する場合の解法を案出した。この方法は、後にガウス消去法と呼ばれるようになる。また、行列式概念を確立し、1684年、行列の余因子展開に基づく線型方程式の別解法も発表している。今日、この方法は『クラメール (Cramer) の方

法』として知られているが、クラメールの論文発表は1750年であり、ライプニッツは60年以上先行していたことになる。なお、和算の大家である関孝和が行列式と同等の概念を発表したのは1683年であり、ライプニッツに先行すること1年、しかも一般性の点で関の業績の方が優れていたとする説もある [10]。

ライプニッツはまた、後のブール代数に繋がる、論理学における形式言語に当たるものを初めて考案し、「どんな推論も代数計算のように単純で機械的な作業に置き換えることができ、注意深く用いることで、誤った推論は原理的に起こり得ないようにすることができる」と主張した。優秀な人材が何人かかかって取り組めば、それを実現するのに5年もかからないと信じていたようであったが、現実には、ジョージ・ブール (George Boole) が1847年に「論理学の数学的分析」(Mathematical Analysis of Logic) を発表するまでに、150年以上の歳月を要した。

2進法を研究したのもライプニッツの業績である。中国の古典『易経』に関心をもっており、1703年、中国で活動したイエズス会宣教師ジョアシャン・ブーヴェ (Joachim Bouvet) から六十四卦を配列した先天図を贈られ、そこに自らが編み出していた2進法の計算術があることを発見している。

ライプニッツの数学的業績のハイライトは、もちろん、微分積分学の確立である。遺されたノートによれば、最初の突破口を開いたのは、1675年11月11日、関数 $y = f(x)$ と x 軸とそれへの2本の垂線が囲む面積を求める問題に取り組んでいるときのことであった。

今日なお微分積分学で用いられる美しい積分記号 \int と dx は、ラテン語の“suuma”と“differentia”から採られた。積分と微分が逆作用素なることを示す『微分積分の基本定理』を絵解きで示したが、その成果を1693年まで発表しなかった。今日、微分積分学の基本定理を発見したのはスコットランドの数学者かつ天文学者でもあったジェームス・グレゴリー (James Gregory) であり、アイザック・バロウ (Isaac Barrow) がより一般的な幾何的証明を与え、アイザック・ニュートン (Isaac Newton) が関連する理論を深めた、とされている。一方、関数の積の微分に関する法則と積分表現されている式の微分可能性とその微分法は、今日でも、それぞれ『ライプニッツの法則』、『ライプニッツの積分規則』と呼ばれている。

1708年、ニュートンの強い勧めの下に、ジョン・キール (John Keill) は、イギリスの王立アカデミー誌 (the Journal of the Royal Society) に「ライプニッツ

はニュートンの微分積分学を剽窃した」と糾弾する論文を発表し、この論争は死ぬまでライプニッツを苦しめた。ライプニッツは即座にこの論文の撤回要求を王立アカデミーに提出、審査委員会が設けられて審議が行われたが、ニュートン自身が非公開で審査委員を務めたとされ、キールの論文に軍配が上げられた。しかし、1900年以降に書かれた数学史の研究者らによる論文では、一様に、ニュートンの体系とライプニッツの体系には重要な差異が存在し、ライプニッツは独自の研究によって成果を得たと結論されている。

ライプニッツのこうした膨大な業績を俯瞰して見れば、フランス科学アカデミーへの手土産程度の気分で取り組んだ計算機械の開発・製造の成果は、彼にとっては些細なものであったかも知れない。しかし、次節に述べるように、19世紀に入り、ライプニッツ計算機は、改良されて実用的な製品として生まれ変わり、大量生産され、商業的にも成功することになった。さらにその機能的原理は、20世紀になって開発される卓上計算機へと受け継がれたのであり、コンピュータの歴史上、確固たる位置を占めているのは確かである。

5. 計算機械の実用化 (オドネル型計算機)

パスカル計算機は十進法に基づいていたが、当時のフランスの通貨リーブルは十進系ではなく、イギリスのポンド、シリング、ペンス (1ポンド=20シリング、1シリング=12ペンス) と似たものであった。つまり、市中での計算需要としては科学技術や工学的な計算よりも金額計算の方が大きく、それにパスカル計算機を使おうとすると、計算結果をさらに変換する必要があった。1799年、フランスがメートル法に切り替えた際、パスカルの基本設計に触発された職人が現れたが、彼らも商業的には成功しなかった。

ライプニッツ計算機は、段付き歯車を導入したことにより、多くの点でパスカル計算機よりも進んでいたが、10進数の桁上がり動作に関しては、未だ不十分であった。これは、歯車を用いた計算機械を考える限り、アイデアで解決できる類いの問題ではなく、当時の金属加工技術の水準に起因する問題であった。こうした理由により、ライプニッツ計算機もまた量産による商品化には至らず、その実用化は19世紀に入ってからのことである。

1820年頃、フランスのチャールズ・ザビエ・トーマス・ド・コルマ (Charles Xavier Thomas de Korma) は、ライプニッツ計算機を実用機として完成させ、アリスモメーター (Arithmometer) という商品名で販売

した。世界で初めて量産された計算機械ではあったが、量産とはいっても月産 1-2 台程度で、当初は信頼性もそれほど高くはなかった。1880 年頃までには信頼性も高まったが、その操作方法は、鉄筆でホイール上の数字をダイヤルし、手でクランクを回して計算を行うというもので、使い勝手が悪く、時間も掛かったので、商業的に成功することはなかった。

1875 年、ロシア生まれでスウェーデンの技術者ヴィルゴット・テオフィル・オドネル (Willgodt Theophil Odhner) が『出入り式歯車』を発明し、以後、この歯車が手動計算機の主流となる。分厚い段付き歯車を使うことなく、置数円板^{おきかず}とピンホイールの 2 枚の円板から構成されており、置数円板の回転角度に合わせて 1 から 9 本のピンが引き出され、それが歯車の役目を果たすという仕組みであった。オドネルは、ライブニッツ計算機の桁移動機構と出入り式歯車を組み合わせてアリスモメーターを改良し、1886 年、オドネル型計算機の製造を始めた。

18 世紀半ばから 19 世紀にかけて起こった産業革命は、産業の変革、それにとまなう社会構造の変化と商業活動の活発化をもたらす、複雑な計算を正確かつ高速に行う社会的需要が飛躍的に拡大していた。経済活動において、大規模な数字を扱う機会が頻繁に発生し、航海の際に必要な天文観測に基づく船の位置の測定や、距離・風向・風速を考慮して行う弾道計算など、複雑な科学計算に対する必要性も確実に高まっていた。こうした社会的需要の成熟化を背景に、オドネル型計算機は、スウェーデン、ドイツ、イギリス、スイスなど、ヨーロッパ各地で広く普及し、世界で初めて商業的に成功した計算機械となった。

この後、計算機械の開発はヨーロッパからアメリカへと移り、日本における開発は 20 世紀に入ってからのことになる。本格的な第 1 世代コンピュータの開発へと繋がるこの時期については、次回、改めて論じることにする。

6. 技術革新の法則 (10) ハードウェア開発における汎用性の重視

これまで見てきた計算機械は、基本的には加算装置である。ネイピアの骨を組み込み、加算を繰り返すことで乗算を行い、10 と 9 の補数を用いて減算を加算として実行し、さらに、それを繰り返すことで除算を実現した。これは、「同じ機構で、可能な限り多くの課題を解決することを目指す」というハードウェアの開発思想として、今日まで受け継がれる内容を含んでいる。

技術革新の法則 (10) ハードウェア開発における汎用性の重視：ハードウェアの開発においては、個別的な問題に対して個別的に対応するのではなく、同じ機構で、可能な限り多くの課題を解決する設計を重視する。

もちろん、汎用ハードウェアと個別的な問題に対応する特殊ハードウェアとの間には、処理スピードとコストの面でトレード・オフが存在する。前者で個別的な問題を解決するためには、特殊性を準備するオーバーヘッドが必要であり、一般的に、後者に比べて処理スピードは遅くなる。しかし、多数の特殊ハードウェアを準備する必要がないので、費用対効果の面では、前者が後者より優れていることになる。今後、この連載で見ていくように、第 4 世代コンピュータまでは、「汎用性を維持したままハードウェアの改善を進め、個別問題の特殊性はソフトウェアで解決する」という開発思想が貫かれており、これは技術革新の法則 (10) の典型例といえる。

7. 技術革新の法則 (11) ICT が社会的インパクトをもたらす条件

ケプラーの月の軌道計算を助けるという明確な目的があったにもかかわらず、シッカルト計算機は、時計製造技術の計算機械への転用に関する技術的未成熟さにより、うまく機能しなかった。パスカル計算機の開発は、やはり、父親の税務計算の労力を軽減するという具体的な動機に裏打ちされており、時計には使用されない『円盤に 10 本のピンを等角度で押し込んだピン歯車』を活用することによって飛躍的に実用性を高めたが、桁上がりの連鎖で発生する摩擦抵抗の累積によって機械が止まってしまうという欠点を抱えていた。当時の金属加工の技術水準が、本質的な壁となって立ちはだかったのである。

オドネルは、『出入り式歯車』の発明によってこの問題を解決し、産業革命の成熟化にとまなう「複雑な計算を正確かつ高速に行う社会的需要の飛躍的拡大」と相俟って、商業的に成功することができた。1621 年、シッカルトが計算機械の開発に着手してから、1886 年、オドネル型計算機の大量生産が始まるまで、実に 265 年の歳月を必要としたことになる。しかし、この開発過程には、今日に通じる重要な教訓が隠されている。

技術革新の法則 (11) ICT が社会的インパクトをもたらす条件：ICT が社会的インパクトをもたらすまでに影響力をもつためには、

- ① その ICT が提供する機能に対する社会的需要が成熟していること；かつ
 - ② その ICT を実現するために必要な技術水準が、充分な高みに達していること、
- が必要である。

話は少し先走るが、パソコンの先駆的存在であった Xerox 社の卓上コンピュータである Xerox Star が、技術的に傑出していたにもかかわらず、市場に先行し過ぎていたが故にビジネスとして成功しなかったことは、この技術革新の法則 (11) の一例である。

先述した「汎用性ハードウェアを用い、個別的な問題はソフトウェアで解決する」という第4世代コンピュータまでの開発思想は、半導体の微細化技術の発展により、費用対効果の面でハードウェア・コストが飛躍的に減少したことに比し、人間が介在するソフトウェアの開発コストは下がらず、いわゆる『ソフトウェア危機 (Software Crisis)』という現象をもたらした。

これに対し、さまざまな製品のデジタル制御化が普及したことと、半導体の微細化技術のさらなる発展との複合作用によって、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) や MPU (Micro Processing Unit) が登場し、今日のユビキタス・コンピュータ社会を牽引するようになった。これは「需要が充分に見込まれる機能に関しては、汎用機を用いてソフトで実現するのではなく、チップに処理回路を刻み込んだ“特殊ハー

ドウェア”で処理してしまおう」という、新たな開発思想の出現を意味し、技術革新の法則 (11) が当て嵌まる典型例である。今後、この法則の実例を数多く見ていくことになる。

参考文献

- [1] H. Goldstine, *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton University Press, 1972. (末包良太・米口肇・犬伏重之訳, 『復刊 計算機の歴史—バスケからノイマンまで—』, 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, 『エニアック—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, Blaise Pascal, https://en.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal (2021年1月23日閲覧)
- [7] Wikipedia, Wilhelm Schickard, https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Schickard (2021年1月23日閲覧)
- [8] Wikipedia, ゴットフリート・ライブニッツ, <https://jp.wikipedia.org/wiki/ゴットフリート・ライブニッツ> (2021年1月25日閲覧)
- [9] Wikipedia, ピエール・ド・フェルマー, <https://jp.wikipedia.org/wiki/ピエール・ド・フェルマー> (2021年1月25日閲覧)
- [10] Wikipedia, 関孝和, <https://jp.wikipedia.org/wiki/関孝和> (2021年1月28日閲覧)