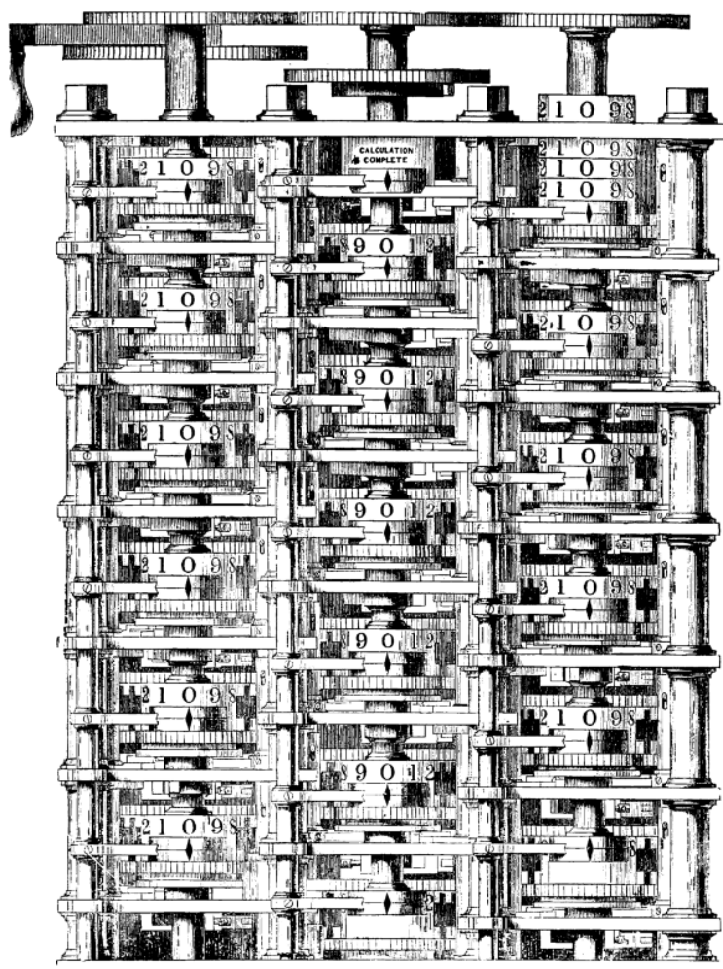


計算技術の歴史的発展 Part.1

発展構造論的視点から見た計算技術の歴史的展開プロセス(1)

--- そろばんからパラメトロン計算機まで ---

佐野正博



B. H. Babbage, del.

目次

(1) はじめに	1
(2) 「道具」段階における計算技術の歴史的発展.....	3
a. そろばん ---- 技術論的視点から見た現代的計算機との構造的共通性.....	3
b. ネーピアの算木(計算棒)による乗算器(1614) --- 計算表の利用による計算ステップ数の削減	3
c. 計算尺(17 世紀) --- アナログ型計算を実行するための道具.....	4
(3) 「機械的計算機」段階における計算技術の歴史的発展	4
a. 歯車を演算素子とすることによる、演算作業の機械化 --- 計算「道具」から計算「機械」へのイノベーション	4
b. 歯車式の機械的計算機に関する動力のイノベーション(1) --- 演算素子の集積度向上(同時に利用する演算素子数の増大)に対応するための蒸気動力駆動.....	6
c. 歯車式の機械的計算機に関する動力のイノベーション(2) --- 電動モーター駆動の calculator	9
d. 機械的計算機における演算素子のイノベーション --- computer および calculator における「歯車」式から「リレー」式へのイノベーション	9
(4) 「電子的計算機」段階における計算技術の歴史的発展.....	11
a. 真空管を演算素子とすることによる、演算作業の電子化	11
b. 機械的計算機から電子的 Computer へのイノベーション --- Computer 分野における、真空管による演算素子の電子化とプログラム動作の実用化の先行	11
c. 電子的 computer における真空管からトランジスタへの演算素子のイノベーション	11
d. 電子的 calculator における真空管からトランジスタへの演算素子のイノベーション	13
e. 電子的計算機の演算素子に関する日本独自のイノベーション ---- パラメロン計算機.....	13
(5) 計算技術の歴史的発展構造とマイクロプロセッサ	15
参考文献および補注	17
[英語文献].....	17
[日本語文献].....	18
参考＞ネーピアの算木による平方根の計算方法.....	20

表紙は、Babbage(1864) *Passages from the Life of a Philosopher* の扉に掲載されている Babbage の階差機関のモデル図である。

(1) はじめに

計算作業の「機械」化や「電子」化に必要なとされる基本的な技術的構成要素は、演算対象となるデータ、演算作業の途中のデータ、演算結果データ、プログラムなどの「記憶」装置、演算を実行する「演算」装置、演算対象となるデータを入力する「入力」装置、演算結果のデータを表示したり印刷したりするなど外部に出力する「出力」装置(表示装置、印刷装置など)である。本稿において主として取り扱うのは、こうした技術的構成要素の内の「演算」装置がどのように「機械」化・「電子」化されてきたのかということである。

演算を実際に実行する演算素子の最初の「機械」化は、「そろばんの玉の移動」から「歯車の運動」への移行によって実現された。そうした演算素子に関する技術発展がなされた後に、「歯車」という演算素子を動かす動力部の技術発展が追求され、人間の手でハンドルを回す手動の歯車式計算機、蒸気機関を動力源とする歯車式計算機、電気エネルギーによる電動モーターで動かす歯車式計算機へと発展を遂げた。演算作業を担う中核的構成要素である演算素子のイノベーションが先行し、演算素子を動かす動力源のイノベーションがそれに引き続いて起こったのである。

しかし「歯車」を演算素子とする歯車式の機械的計算機は、動力源に関するイノベーションによる速度向上には一定の限界があった。そこで「歯車」の回転速度の限界を超えるイノベーションが技術的課題となった。演算速度の向上を可能とした演算素子に関する技術発展は 20 世紀中頃以降に実現した。

演算素子に関する技術革新の試みの一つは、機械的計算機における歯車から電磁的リレーへの技術革新であった。1940 年代～1950 年代には、ベル研究所の Mode II(1942)や、ハーバード大学の Mark I(1944)、富士写真フイルムの FUJIC(1956)など、電磁石の磁力によるスイッチの開閉を利用した機械的な電氣的回路である「リレー」を演算素子とするリレー式計算機の実用化がなされた。

しかし「リレー」という演算素子は電磁的作用を用いているとは言え、「歯車」と同じく機械的装置であった。「リレー」も機械的動作による演算素子であったことから、そのスピードには一定の限界があった。そうした限界を超えたさらなる高速化は、演算素子を「機械」的(mechanical)なものから「電子」的(electronic)なものに変える技術革新によって実現された。

電子的な演算素子として最初に登場した回路素子が「真空管」である。ただし真空管式電子計算機の研究開発それ自体は、リレー式計算機とほぼ同時期におこなわれた。「機械」的計算機という技術的方式の枠組みにおける歯車からリレーへの技術革新の試みと同時に、「機械」的計算機から「電子」的計算機への技術革新の試みがなされたのである。異なる二つの技術的方式が同時期に追求された一因は、真空管という演算素子が、同時期の競合技術であるリレーに比較して長寿命化・高集積度化・消費電力低減という点において困難を抱えていたことにある。

真空管のこうした困難の技術的克服を可能にしたのが演算素子の半導体化である。演算素子の半導体化はまずディスクリート半導体(個別半導体)として実現された。ディスクリート半導体(discrete semiconductor)とは、半導体を素材とした回路素子の「ダイオード」や「トランジスタ」を集積化せずそのまま個別で用いた半導体素子である。二極真空管に代わって半導体ダイオードを、三極真空管に代わって半導体トランジスタを回路素子として利用することで性能向上を実現することができた。

電子的演算素子を用いた computer として、「真空管」を演算素子とする ENIAC(1946)や EDSAC(1949)などの computer を第一世代とすると、UNIVAC-1(1951)、IBM-701(1953) といった「トランジスタ」を演算素子とする computer が第二世代となる。

第二世代以降は演算素子としてトランジスタを用いている点では共通しているが、トランジスタの集積度によって世代分類がおこなわれている。第二世代ではトランジスタが単独の独立した回路素子として用いられたが、IBM360(発表 1964 年、出荷 1965 年)や DEC PDP-8(発表 1965 年)などの第三世代 computer ではダイオード、抵抗、コンデンサー、コイルなどといった種々の回路素子を一つにまとめた集積回路(Integrated Circuit, IC)が用いられている。回路素子の集積度を IC よりも大きくした大規模集積回路(Large Scale Integrated circuit, LSI)を用いたのが IBM4300(発表 1979)などの第四世代 computer である。

このように第二世代以降は、トランジスタの集積度の向上を実現する技術革新が進展する中で、computer の性能向上が実現された。

本稿では以上のように演算素子という視点から計算技術の歴史的発展構造を解明しようとするものであるが、その全体的構図を図式化すると、エラー! 参照元が見つかりません。のようになる。

表1 計算技術の歴史的発展構造

分類1		道具	機械							
分類2		計算道具	機械的計算機				電子的計算機 (電子計算機、コンピュータ、および、電卓)			
分類3		手動式 計算道具	手動 歯車式 計算機	蒸気動力 歯車式 計算機	電動 歯車式 計算機	電気機械式 (リレー式) 計算機	[第1世代] 真空管式 電子計算機	[第2世代] トランジスタ式 電子計算機	[第3世代] IC式 電子計算機	[第4世代] LSI式 電子計算機
演算素子 (計算プロセス実行 のための回路素子)			歯車			リレー(1835)	真空管(1904) 3極真空管(triode) 2極真空管(diode)	個別半導体 トランジスタ(1948) 半導体ダイオード	集積回路(IC) (1958)	大規模集積 回路(LSI) (1968)
動力		人間動力		蒸気動力	電気動力					
					(電動モータ用)	(リレー動作用)	(電気回路の動作用)			
計算機	非プログラム型 計算機 (calculator 系計算機)	そろばん アバカス 計算尺	パスカルの 計算機(1642) ライプニッツの 計算機(1671) アリスモメータ (1820) タイガー計算機 (1923)	バベッジの 階差機関 (1820-)	モンロー電気 計算機(1925) タイガー電気 計算機(1960)	カシオ計算機 14-A(1957)	乗算穿孔機 IBM 604(1947) CPC (Card-Programmed Electronic Calculator)	電卓(電子式卓上型計算機)		
	プログラム型 計算機 (computer 系計算機)			バベッジの 解析機関 (1834-)		ベル研究所 ModelI(1942) ハーバード大学 MarkI(1944)	ENIAC(1946) EDVAC(構想1944) EDSAC(稼働1949) UNIVAC-1(1951) IBM701(1953) IBM650(1954)	シャープ コンベット CS-10A(1964) キヤノン Canola 130 (1964)	シャープ コンベット CS-31A(1966)	サンヨー ICC-141(1968) シャープ QT-8D(1969)
						富士通 FACOM100 (1954)	富士写真フイルム FUJIC(1956) 東京大学 TAC(1959)	ベル研究所 TRADIC(1954) UNIVAC Solid State Computer(1958) IBM7070(1960)	DEC PDP-8 (発表1965年) IBM360 (発表1964年 出荷1965年)	MIT Altair8800 (1975) IBM4300 (発表1979年)

(2) 「道具」段階における計算技術の歴史的発展

--- デジタル型計算用道具としてのそろばん vs アナログ型計算用道具としての計算尺 ---

a. そろばん ---- 技術論的視点から見た現代的計算機との構造的共通性

そろばんの形態をした道具は、3,000-4,000 年前に既に存在したと言われている。そろばんは、古くからある計算道具であるが、その技術的構成は現代のデジタル・コンピュータと一定の構造的共通性を持つものとして技術論的には解釈することができる。

例えば、計算対象となる数値や計算の途中結果を一時的に記憶する「レジスタ」素子、および、計算結果を表示する「表示」装置は、そろばんの玉の記憶機能や表示機能の電子化として解釈することができる。また現代の CPU で計算表を用いることは、そろばんにおいて「掛け算九九」や「割り算九九」を用いることの電子化として解釈することができる。

b. ネーピアの算木(計算棒)による乗算器(1614) --- 計算表の利用による計算ステップ数の削減

ネーピア(John Napier,1550-1617)は、科学計算作業の効率的実行に努力した人物であり、対数の発見者としても知られているが、計算作業を補助する道具である Napier's bones (別名 Rabdology)の発明者でもある。

Napier's bones による計算では、九九の乗算結果を記入した算木(計算棒)が用いられる。図 1 に示したような

各算木の各欄には左上に乗算結果の十の位の数字が、右下に乗算結果の一の位の数字が書かれている。7の算木を例にとると、 $7 \times 1 = 7$ 、 $7 \times 2 = 14$ 、 $7 \times 3 = 21$ 、 $7 \times 4 = 28$ 、 $7 \times 5 = 35 \dots$ なので、1の欄が0/7、2の欄が1/4、3の欄が2/1、4の欄が2/8、5の欄が3/5 $\dots$ となっている。

Napier's bones の基本的利用法は、図 1 のように算木を桁数分だけ並べて、算木に書かれた数字の和を取ることで乗算作業の補助をすることである。Napier's bones による乗算結果の求め方自体は筆算による求め方とまったく同一であるが、筆算において必要な九九の暗算作業を省略できる点はその道具を使うメリットである。(なお乗算だけでなく除算も実行できるし、本稿の末尾の参考解説で示したように、平方数が書かれた算木を用意すれば、平方根を求めることもできる。)

計算結果を一覧表として用意し計算処理作業において利用するというこうした技術的手法は、20 世紀の電子計算機 IBM 1620(1959)⁽¹⁾ [加算の実行時に加算表を参照するようになっていた]や、インテルの Pentium プロセッサ⁽²⁾ [除算の実行に際して計算表の参照により計算ステップ数を減少させて計算の高速化を図っていた]などでも用いられている。

図1 ネーピアの算木による乗算の計算法

1	7	4	6
2	1 4	0 8	1 2
3	2 1	1 2	1 8
4	2 8	1 6	2 4
5	3 5	2 0	3 0
6	4 2	2 4	3 6
7	4 9	2 8	4 2
8	5 6	3 2	4 8
9	6 3	3 6	5 4

746×8 を計算する場合、7 の算木、4 の算木、6 の算木各 1 本を左図のように左から順に並べる。そうすると、8 の欄に書かれた数字を利用して乗算の結果が 5968 となることがわかる。

千の位は 7 の算木の左上の数字の「5」、一の位は 6 の算木の右下の数字の「8」となる。

百の位は 7 の算木の右下の数字「6」と 4 の算木の左上の数字「3」の合計 9 であり、十の位は 4 の算木の右下の数字「2」と 6 の算木の左上の数字「4」の合計 6 となる。

すなわち、

千の位: 5

百の位: 6+3=9

十の位: 2+4=6

一の位: 8

となる。

(1) IBM1620 は、表を用いて加算を実行するように設計されていたため、加算を実行する回路がハードウェア的には存在していなかった。

(2) インテルの Pentium プロセッサは、浮動小数点型計算における除算の実行に際して計算表を用いて計算時間の短縮を図っていた。インテルが 1994 年に出荷した Pentium プロセッサの一部に、「除算のためのハードウェアの実装に際して用いられた計算表の一部の値が間違っていた」(Intel,2004)ため誤動作を起こすというバグがあった。インテルは最初このバグが問題となるのは科学技術計算作業の場合だけであり、動作速度は遅くなるがソフトウェア的対応も可能であることから製品リコールを避けようとしたが、結局のところ希望者には製品交換に応じるという対応に追い込まれた。

c. 計算尺(17 世紀) --- アナログ型計算を実行するための道具

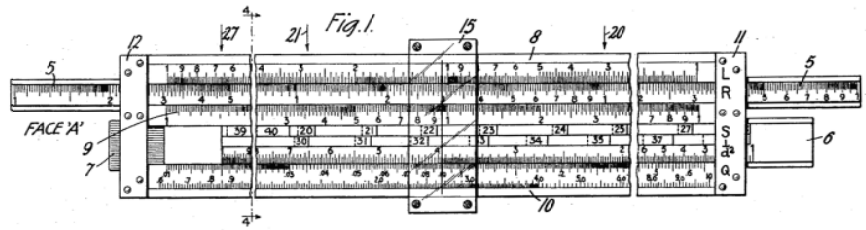
1620 年、イギリスのガンター(Edmund Gunter, 1581 - 1626)の考案した対数目盛を応用したものが計算尺の原型と言われている。

$\log AB = \log A + \log B$ であることを利用すると、かけ算を足し算として実行することができる。平方や立方も、 $\log A^2 = 2\log A$ 、 $\log A^3 = 3\log A$ であることを利用すると、足し算として実行することができる。また、 $\log A/B = \log A - \log B$ であることを利用すると、除算を引き算として実行することができる。

このことを利用すると、2 種類のものさしを人間の手で移動させることで対数の値の和（あるいは差）を求めることができ、それによって2つの数の積と商を計算することができる。

現在の計算尺は、固定された台尺とこれに平行に動かせる滑尺と呼ばれる2種類のものさし、および、カーソルからなり、どちらにも同じ尺度の目盛が刻まれていて、一方を滑らせて目盛を合わせることで、

図2 現代的な計算尺の一例(1918)



[出典]Dobson(1918)

対数の値の加減を求めて2数の積と商を計算することができる。こうした形態の計算尺の起源は、フランスのアメデ・マンハイム(Amédée Mannheim, 1831 - 1906)が1850年頃に考案した計算尺と言われている。

そろばんやアバクス(abacus)はいわばデジタル型計算を実行する道具であるのに対して、計算尺はいわばアナログ型計算を実行する道具である。計算時間の短縮よりも計算精度が重要な場合にはデジタル型計算が、計算精度よりも計算時間の短縮が重要な場合にはアナログ型計算が適している。

(3) 「機械的計算機」段階における計算技術の歴史的発展

a. 歯車を演算素子とすることによる、演算作業の機械化 --- 計算「道具」から計算「機械」へのイノベーション

計算技術の歴史的発展においても他の技術と同じく、「道具」から「機械」への技術的発展という形態の技術的進歩が存在する。

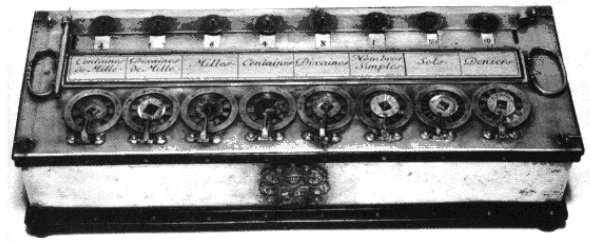
そろばんがそうであったように、データの記憶や表示といった機能は計算「道具」が担っていたが、加算・減算・乗算・除算などの演算機能それ自体は人間が担っていた。すなわち、演算処理をおこなう ALU(Arithmetic Logic Unit、演算論理装置)、割込処理やタイミングなどの制御回路装置、命令やデータの入出力を担うインターフェースなど現代のデジタル型 computer における CPU が担っている処理機能は人間が担っていた。

そろばんなどの計算「道具」には担わせることができなかったそうした処理機能の一部を機械化することが計算技術の次の発展段階を構成している。最初の技術的発展は、「歯車」を演算素子として用いることで加算・減算・乗算・除算などの演算処理を機械化することが実現された。

初期の手回し計算機 --- 手動で動かす歯車式計算機

歯車のかみ合わせを利用して計算を行う初期の手動式計算「機械」としては、ダイヤルを数字分だけ回すことで加減算を実行するマシン⁽³⁾である Wilhelm Schickard (1592-1635) の Calculating Clock(1623)、フランスの貨幣単位に対応し税務計算を目的として加算⁽⁴⁾を実行できたパスカル(Blaise Pascal, 1623-1662)の計算機 Pascaline (1645)、加算の繰返しで乗算を、減算の繰返しで除算を実行する四則計算機であったライプニッツ(G.W.Leibniz, 1646-1716)の計算機(1671)などが有名である。

図3 パスカルの計算機(1642)



[出典]Goldstein(1972) *The Compute*, Illustration 2

19 世紀における手回し計算機の実用化--- Charles Xavier Thomas(1820), Frank Stephen Baldwin(1875)

パスカルやライプニッツの計算機は、簡単な数値に対しては正しく計算を行えたが、桁上げが数桁以上繰り上がる時には、正しく動作しなかった。それは、機械設計上の弱点と加工精度の不十分さに起因したものであり、当時の技術では解決できなかった。

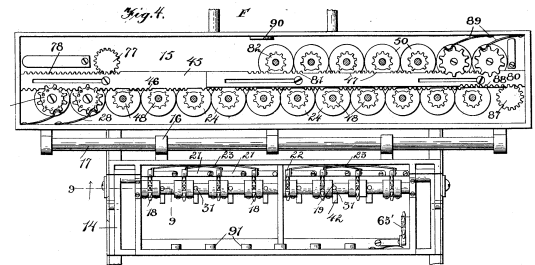
実用的な手回し計算機が登場したのは 19 世紀になってからである。1820 年にはトーマス(Charles Xavier Thomas)がライプニッツの計算機を改良した計算機を、18775 年にはボールドウィン(Frank Stephen Baldwin, 1838 - 1925)の計算機が商業的に生産されるようになった。

この種の計算機の一応の完成品は、1891 年に売り出されたスウェーデンのオドナー (Willgodt Theophil Odhner, 1845-1905) の計算機 Arithmometer である。

なお 19 世紀には後述するバベッジのように、歯車式計算機を手動式から蒸気動力駆動式に技術革新しようとする試みもあったが、そうした技術革新の試みは社会的に広く普及することはなかった。

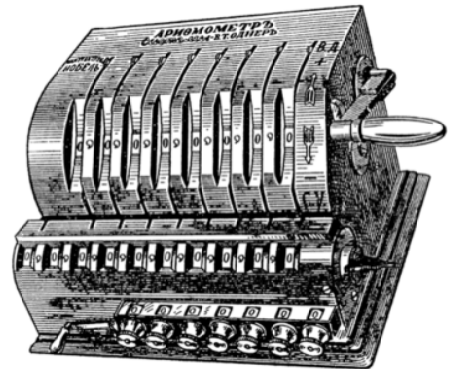
日常生活や会計作業における計算は、手動式計算機でほぼ対応可能であった。手動式計算機を超えるような機能や性

図4 ボールドウインの特許申請図(1889)



[出典] Baldwin(1889) Fig.4

図5 オドナーの計算機(1877)



[出典] Leipälä (2003) p.10

能を持ったマシンに対する市場ニーズが問題となるのは 20 世紀前半以降のことである。より高速でプログラム処理が可能な電子式計算機に対する市場ニーズの顕在化のためには、技術的シーズとして高速度で動作する演算素子の技術革新や、記憶装置や表示装置に関する技術革新の実現を必要としたのである。

しかも電子式計算機が技術的に製造可能となり、初期市場の形成後も、電子計算機の製造コストが高かったことから、手動式計算機に対する市場ニーズは 20 世紀後半になってもまだ一定存在し続けたのである。

(3) 自動繰り上がり機構を有してはいるが、加減算の操作からすると原始的な計算機であった。すなわち、300 を加算する場合には 100 の位のダイヤルを 3 数字分だけ右に回し、300 を減算する場合には 100 の位のダイヤルを 3 数字分だけ左に回すという機構であった。

(4) 減算は直接的には実行できなかった。補数を利用することで間接的に減算を実行する仕組みになっていた。

20 世紀日本における手回し計算機 ---- 矢頭良一(1902)および大本寅次郎(1923)

日本では、1902 年に矢頭良一が独自の構想による手回し計算機自働算盤を特許出願し、その後数年間に二百数十台を製造・販売した。

1923年には大本寅次郎(1887-1961)がタイガー計算機⁽⁵⁾の愛称で親しまれることになる計算機を開発した。当初は、公務員初任給の半年分以上というほどの高価格であったが⁽⁶⁾、1953年から販売終了の1970年までかなりの物価上昇があったにもかかわらず3万5千円という同一価格を守り通して相対的な低価格化が進んだことにより出荷数が増加し、ピーク時の1968年頃には年間約4万台の出荷数を誇り、1970年頃までに累計で約50万台を製造・販売された。なお手回し式計算機として知られたタイガー計算機も1960年には電動モーターで動かすタイプの「E60-3型」が販売開始されるなど、手動式から電動式になっている。

こうした歯車式計算機は、電子式の第一世代 computer の真空管式計算機だけでなく、第三世代の集積回路式計算機の普及した 1960 年代末頃まで、多くの会社における経理など事務計算用のマシンとしての寿命を保ったのである。

歯車式計算機が商品競争力を最終的に失うことになったのは、対抗商品としての卓上型電子計算機(desktop calculator)、すなわち、電卓の価格が 20 万円を割るようになった 1969 年頃である。

図6 タイガー計算機(1931)



[出典] 株式会社タイガーWeb ページ、http://www.tiger-inc.co.jp/temawashi/img/tmws7111_2.jpg

計算技術をめぐる二種類のバリュー・ネットワークの存在

電子式の第一世代 computer から第三世代 computer へと連なる 20 世紀後半期における高性能性を追求した計算機の技術発展の一方で、そろばんや歯車式計算機といった旧世代の技術に基づく計算機がこのように戦後も長く使用され続けたことは、計算ニーズに関わるバリュー・ネットワークが二種類存在することを示している。すなわち、大量の計算を高速かつ高い信頼性で実施することができるといった＜高性能性＞重視のバリュー・ネットワークと、低価格で計算を実行できるといった＜低価格性＞重視のバリュー・ネットワークの二種類が明確に分離された製品市場として存在することを示している。

CPUの技術発展の流れも、こうした異なる二つのバリュー・ネットワークの存在に対応して二種類に分かれている。

b. 歯車式の機械的計算機に関する動力のイノベーション(1) ---演算素子の集積度向上(同時に利用する演算素子数の増大)に対応するための蒸気動力駆動

大きな数の計算をしようとすればするほど、あるいは、複雑な計算を自動的に実行させようとすればするほど、演算時間がより長くなるだけでなく、より多数の演算素子を必要とする。歯車を演

(5) 1923 年 5 月に完成した第一号機は、発明者大本寅治郎の名前の「寅」ととって「虎印計算器」と命名し発売開始されたが、同年 11 月に「タイガー計算器」というように名称変更された。(株式会社タイガーの会社沿革 <http://www.tiger-inc.co.jp/kaisya/kaisya.html> の記述による。)

(6) 株式会社タイガー(2002)「20 世紀の産業遺物 : 手廻し式計算機器の変遷」タイガー手廻計算器資料館 <http://www.tiger-inc.co.jp/temawashi/temawashi4.html> によれば、1931 年に公務員初任給が 75 円であったのに対して、495 円と 6 ヶ月分以上の価格であった。

算素子とする歯車式計算機の場合にはその結果として、噛み合わさる多数の歯車の間での摩擦力がより大きくなる。

また多数の計算の連続的＝自動的実行をさせようとすると、計算時間実行時間がより長くなるだけでなく、計算結果の自動的保存が必要になる。計算結果は何らかの形で「出力」することが必要であるが、前述したそろばんや歯車式計算機では、計算結果を目で見える形で「表示」出力することができただけで計算結果の自動的保存はできなかった。計算結果は計算作業が終了したその都度、手で書き写すなど手動で保存するしかなかった。

しかし多数の計算を連続的かつ自動的に実行させる場合には、計算作業によって生み出される多数の計算結果をそのように手動で「保存」することは現実的ではないし、転記ミスの発生による「保存」結果の信頼性低下の原因となる。そこで計算結果を単に「表示」出力するだけでなく、何らかの記憶装置に保存するか、印刷機によって「印字」出力することが必要であった。

現代のコンピュータでは、HDD やフラッシュメモリなどの外部記憶装置の発達により、「印字」出力することなく記憶装置への「データ」出力にとどめることが多いが、19 世紀の段階では記憶装置に関する技術が未発達であったため、バベッジは多数の計算結果の保存を印刷機による自動的印字という形で実現しようと意図した。しかし印刷機による自動的印字のためには、その動作のために人間動力よりも大きな動力源である蒸気動力などの装置の利用を必要とした。

複雑な計算の自動的実行や多数の計算の連続的＝自動的実行に対応した製品イノベーションを歯車式機械的計算機の技術的方式において実用的なものとする先駆的試みが、歯車式計算機を動かすための動力として蒸気動力機関の利用を想定したバベッジの計算機である。

蒸気動力機関で動かす calculator タイプの歯車式計算機 --- バベッジの階差機関

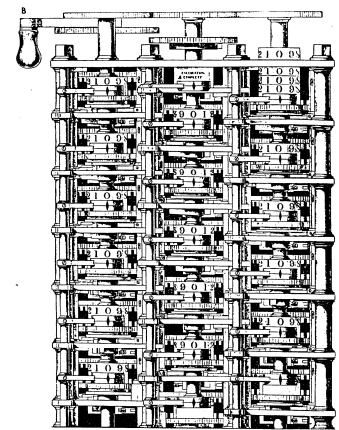
どのような多項式の数列でも階差を一回取るか、あるいは、その階差によって構成される数列に関してまた階差を取るといった作業を何回か繰り返すと、最終的には階差が一定の数となる。

多項式の数列に関するこうした数学的性質を利用すると、加算によって多項式の数値を算出することができる。例えば整数を累乗した値は、二乗や三乗だけでなく何乗であっても加算だけで計算することができる。階差によって関数の値を計算する歯車式計算機が階差機関 (Difference Engine) である。

バベッジ(Charles Babbage,1792-1871)は、1820 年に階差機関の構想を発表した後、イギリス政府の約 17,000 ポンドの援助およびそれとほぼ同じくらいの自己資産の投入により研究・開発を続けた。階差機関のプロトタイプは 1833 年には完成したが、当初構想の機械は 1842 年になっても完成させることができず、イギリス政府は階差機関の研究・開発を断念した。

その後、バベッジの階差機関の説明書がスウェーデンに渡り、その国の技師イエオリ・シュウツの手によって 1834 年に動作する階差機関が完成された。

図7 バベッジの階差機関 のモデル



[出典]Babbage(1864)の扉絵

図8 階差機関の歯車



[出典]Swade(2005)p.71

蒸気動力機関で動かす computer タイプの歯車式計算機 --- パンチカードによるプログラム駆動可能な計算機としてのバベッジの解析機関

バベッジは、パンチカードを利用して「計算手順の命令」を与えて、計算をおこなう歯車式計算機械である解析機関 (Analytical Engine) に関する最初の記述は 1834 年中頃になされ、1836 年中頃には、動作可能な設計にまで進歩を遂げているが、結局のところ動作する製品を完成させることはできなかった。

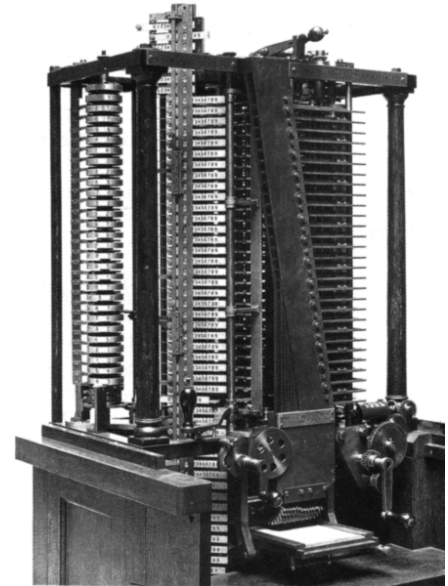
パンチカードは、Joseph Marie Jacquard (1752-1834) が 1801 年に考案したジャガード織機において編む模様を機械に指示するために既に使われていたものであるが、バベッジはこれにプログラムやデータを記録させることを考えたのである。いわば解析機関は、カードによって「代数的な模様を織る」機械である (Ada, 1843)。バベッジは、Jacquard 織機と解析機関の間には「ほぼ完全なアナロジーが成立する」(Babbage, 1864, p.117) としている。なおパンチカードのこうした利用は、1940 年代～1970 年代の電子計算機において実際になされている。

解析機関の設計においてバベッジは、計算機に「store」、「mill」「control」という 3 つの機能を持たせようと考えた⁽⁷⁾。Store は、演算結果および演算対象となるすべての変数を記憶するための装置であり、mill は演算対象を処理するための装置である。Control の一例は図 10 のような装置である。(図 10 の装置はマイクロプログラミング機能を実現するための装置と言われている。)

このようにこれらの装置は、今日の computer における記憶装置、演算装置、制御装置に相当するものであった。

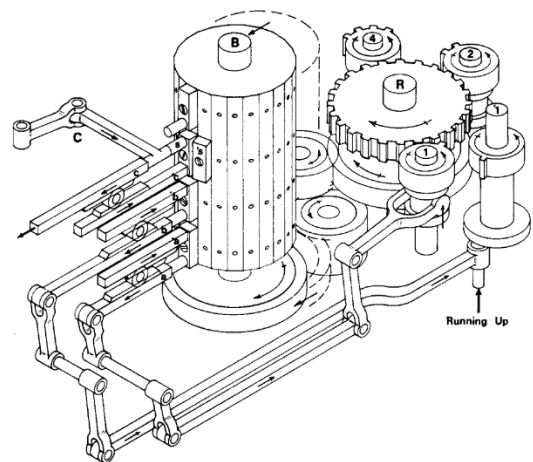
バベッジの解析機関の構想は、当時の技術的制約から実際には完成品としてうまく実現することはできなかった。また歯車を演算素子として利用する機械的計算機ではプログラム駆動において実用的な速度の確保が困難であったと思われるが、バベッジの解析機関の構想には computer の設計思想として現在につながるものがあつた。

図9 バベッジの解析機関の一部



[出典]Williams(1997) p187

図10 歯車式計算機における「CPU」 --- バベッジの microprogram control 装置



[出典]Bromley(1982) p.205 の Figure 8

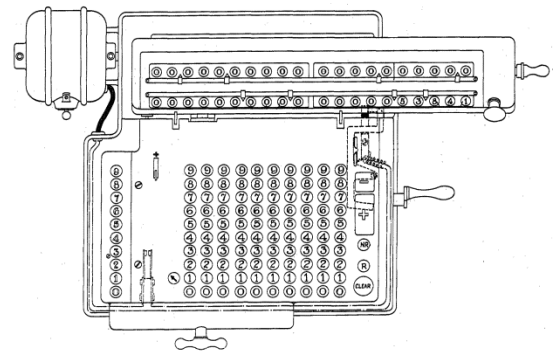
(7) バベッジは Babbage(1864)p.117 においては解析機関が store と mill という二つの部分から構成されているとしているが、本文中にあるように store と mill に加えて、control 装置もバベッジは考えている。

c. 歯車式の機械的計算機に関する動力のイノベーション(2) --- 電動モーター駆動の calculator

手回しの歯車式計算機と同様の内部的機構を持つマシンに電動モーターを取り付けることで、手回し作業を不要としたものが、電動の歯車式計算機であり、一般には電動計算機(electromechanical calculator)と呼ばれている。

機械的計算機における電気動力へのこうしたイノベーションは、20 世紀前半に生じた。電動計算機の代表的なマシンが、米国モンロー社の電動計算機で、図 11 のように数値の各桁ごとにテンキーを持ついわゆるフルキーボード式電卓であった。

図11 モンロー社の電動電卓



[出典] Masch(1929)の Figure 1 を一部修正
(左端上部が電動モーター部である)⁽⁸⁾

d. 機械的計算機における演算素子のイノベーション --- computer および calculator における「歯車」式から「リレー」式へのイノベーション

リレーを演算素子とする機械的 computer

プログラム駆動型の機械的計算機の実用化は、歯車駆動の動力源に関する蒸気動力や電気動力というイノベーションによってではなく、演算素子に関する「歯車」から「リレー」(継電器)へのイノベーションによって実現された。リレーとは、電磁石に電流を流すと発生する磁力を利用してスイッチのオン・オフを機械的にこなう装置である。

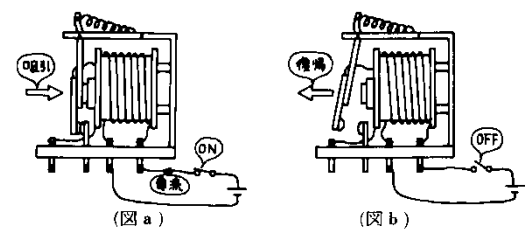
ただし新しい演算子であるリレーという機械的部品は、より高速な機械的計算機に対する必要性に対応して新規に発明されたものではなく、電話交換機用の部品として既に利用されていた部品である。歯車を演算素子とする機械的計算機の高速化のための技術的シーズ(seeds)としてリレーが利用されたのである。

リレーが演算素子として利用可能であることは 1930 年代後半に広く知られるようになった。プログラムが動作するリレー式計算機の最初期のものに、ドイツのツーゼ(Konrad Zuse, 1910-1995)の Z2(1939、リレー数 600 個)や Z3(1941、リレー数 2,600 個)、アメリカのエイケン(Howard Aiken)が考案し IBM が製作した Harvard Mark I(1944、リレー数 3,304 個)などがある。

エイケンのハーバード大学における博士論文の指導教授 E. L. Chaffee の専門は真空管および真空管回路であり、エイケンの博士論文も真空管に関わるエレクトロニクス分野のものであったにも関わらず、エイケンが Harvard Mark I において演算素子として真空管ではなくリレーを選択したのは、技術的問題というよりは「製造コスト」および「実際の設計・開発を担ったのが IBM であった」という二つの要素によるものである。

例えばエイケンはリレーを選択した理由に関するインタビューの中で、「答えは製造コストにある。(the answer is money)」、「真空管を用いたデジタル・カウンターの技術を利用することで、電子的部品を用いて製造可能なことは明らかであった。・・・もし RCA が興味を持っていれば、[真空管を用いた] 電子的計算機となったであろう。」(Cohen, 1999, p.43、[] 内は引用者による補足)

図12 リレーの開閉動作に関する図



[出典] 松下電器製造・技術研修所(1978)p.63

(8) モンローの最初の電動計算機は 1922 年の Monroe Model K(1922)であり、それに関連した 1922 年申請の特許 Chase(1922)にも同様の図がある。

と述べている。

リレー式計算機は第二次大戦中だけでなく、Harvard Mark I の後継機 Harvard Mark II(1947)などに見られるように第二次大戦終了後も製作されている。ENIAC(1946)や EDVAC(1948)など真空管式電子 computer が登場した後に、リレー式 computer が単純に時代遅れのものとしてすぐに廃れたわけではなく、その研究・開発は引き続き行われていた。

戦後日本でもリレー式計算機の研究・開発がおこなわれている。例えば日本で最初に製作されたデジタル式計算機である電気試験所の ETL Mark I(1952)はリレー式 computer であったし、その後継機の ETL Mark II(1955、リレー数 22,253 個)もリレー式 computer であった。また富士通は、1950 年代には真空管式電子 computer の研究開発が主流であったにも関わらず、「当時の真空管の動作があまりにも不安定だった」ことや「電話交換機に用いられる部品であるリレーに関して優れた技術的蓄積が社内にあった」といった技術的理由から FACOM 100(1954)という日本初の実用リレー式 computer を開発するとともに、その後も FACOM128A(1956)、FACOM128B(1958)、FACOM138A(1960)などリレー式の大型 computer の研究開発・販売をおこなっている。

リレーを演算素子とする機械的 calculator

プログラム型計算機である computer 分野だけでなく、四則演算など数値計算を主とする計算機である calculator 分野においても、リレー式計算機の研究開発がおこなわれている。

たとえばカシオ計算機は、1957 年にリレーを用いた卓上型電子 calculator 「カシオ 14-A」(消費電力 300W、重量 120kg、高さ 78cm×幅 101cm×奥行 42cm)を完成させ 485,000 円で販売を開始した。

「カシオ 14-A」は、テンキー入力で数値をランプで表示する方式を採用しており、リレー式であることから歯車式に比べて加減算で 3~4 倍、乗算で 6~7 倍という早さで 14 桁の計算をした。なおテンキー方式を採用したのは、卓上型 calculator として数値入力部の大きさを小さくするためであった⁽⁹⁾。

リレー式電子 computer では 22,253 個ものリレーを利用した ETL Mark II(1955)などに見られるようにプログラム演算、メモリなどの多様な機能を実現するために多数のリレーが使用されていた。これに対して普通の事務作業用途での使用を想定し、小型軽量化や低価格化を実現するとともに、四則演算などに機能を限定した calculator であるカシオ 14-A では使用するリレーの数を 342 個までに減らしていた。

カシオはその後もリレー式計算機の開発を続け、1964 年 6 月にはカシオ 401 を、1965 年 5 月にはカシオ 402 を発売している。



[図の出典]内田洋行のカタログ[<http://www.dentaku-museum.com/calc/calc/2-casio/1-casiod/br/b-1.jpg>]

(9) フルキー方式ではそのマシンで四則演算可能な桁数が多くなればなるほど入力部のスペースが大きくなってしまふ。

(4) 「電子的計算機」段階における計算技術の歴史的発展

a. 真空管を演算素子とすることによる、演算作業の電子化

b. 機械的計算機から電子的 Computer へのイノベーション ---Computer 分野における、真空管による演算素子の電子化とプログラム動作の実用化の先行

歯車に代わる演算素子として 20 世紀中頃からリレーと並んで利用され始めたのが真空管である。真空管を演算素子として用いて計算をおこなった最初のマシンは、アタナソフ(John Vincent Atanasoff)とベリー(Clifford Berry)による ABC(Atanasoff-Berry Computer,1942,真空管 280 本)である。ただしこのマシンは、ガウス消去法という数学的手法によって連立一次方程式を解くことに特化した特定目的用マシンであり汎用的計算をおこなえるものではなかったし、プログラム可能でもなかった。

それゆえ ABC 計算機は、演算素子の技術的構成のみに着目した視点からは電子的な計算機として位置づけることができるものであるにしても、ソフトウェアも含めたプログラム動作可能なシステムとしての computer という視点からは最初の真空管式電子計算機と位置づけることはできない⁽¹⁰⁾。

プログラム可能な最初の真空管式電子計算機は、ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer,1946)であり、真空管を 17,468 本も使用し、総重量は約 30 トンもあった。ENIAC 以後も、Manchester Mark I (1949)、EDSAC(1949)、EDVAC(1951)など様々な真空管式電子計算機の開発が続き、UNIVAC I(1951)や IBM701(1952 発表,1953 出荷)、IBM702(1953 発表、1955 出荷)など商用の真空管式電子計算機が登場するまでになり、第一世代 computer の時代が形成されることになった。

日本における真空管式電子式計算機は、アメリカに少し遅れたが 1950 年代後半には富士フィルムの FUJIC(1956,真空管 1700 本) や東京大学の TAC(Tokyo Automatic Computer,1959,真空管 7000 本)などが開発されている。

演算素子の電子化および記憶装置の能力向上により、プログラム動作可能な computer の実用化および商用化が 1950 年代には世界的に可能になったのである。

c. 電子的 computer における真空管からトランジスタへの演算素子のイノベーション

消費電力の大きさや集積度の低さなどの問題から、電子的計算機における演算素子は真空管からトランジスタへと移行した。

トランジスタを演算素子として用いて世界最初に動作した電子計算機は、真空管式電子計算機の演算部を真空管からトランジスタに置き換える形でイギリスで試作されたマシンである。1949 年にイギリスのマンチェスター大学で製作された真空管式電子計算機 Manchester Mark I (1949、真空管 1300 本)の信頼性向上を目的としてグリムスデール(R.L. Grimsdale)の設計のもとに 1953 年にトランジスタ化が実行されたのである。

このマシンは点接触型ゲルマニウム・トランジスタを使用したもので少し信頼性が低く、平均命令実行時間も 30ms と低速であった。Metropolitan-Vickers 社は、信頼性向上のためトランジスタを接合型に代えた上で、それを原型としたトランジスタ式計算機 Metrovick 950 を 1956 年に 6 台完成させている(Lavington, 1980,p.48,

(10) ABC マシンの発明の先行性を根拠として、1973 年 10 月 19 日の米国ミネアポリス連邦地方裁判所において電子計算機に関する ENIAC 特許が無効とされた。そうしたこともあり、ENIAC ではなく ABC マシンが世界最初の電子計算機であるとする見解も強い。

これに対して星野力は、星野力(1995,p.81 および pp.141-142)において「プログラム可変内蔵方式」の計算機をコンピュータと定義する立場から、ABC マシンは真空管を演算素子とする電子的な論理回路を構築するなど独創的で先駆的な業績を挙げたものではあるが、プログラム内蔵ではないという意味で世界最初のコンピュータとするのは不適當である、としている。

また星野力とは異なる立場からではあるが、能澤徹は、ABC マシンの最大の功績は「真空管による演算器の作動」(能澤徹,2003,p.165)にあるとし、「プログラム制御機構ないしはその概念はまったく存在しなかった」(能澤徹,2003,p.159)ことなどから「コンピュータというには不十分なもの」(能澤徹,2003,p.155)であった、としている。

邦訳 p.64)。

アメリカにおける最初のトランジスタ式電子計算機は、ベル研究所が1954年に完成したTRADIC(TRANsistor DIGital Computer または TRAnsistorized Airborne DIGital Computerの略)である。TRADICは、684個の点接触型トランジスタと10,358個の点接触型ゲルマニウム・ダイオードを使用し、加算実行時間 $16\mu s$ 、乗算実行時間 $300\mu s$ という性能であった(Irvine,2001,p.34)。

IBMも早くからトランジスタに関心を持ち、計算機におけるトランジスタ利用のための研究開発をおこなっている。例えばIBMのHalsey Dickinsonは、ベル研究所による点接触型トランジスタの発明に関する1948年の発表から数週間以内に見本のトランジスタを取り寄せ、トランジスタに関する研究を始めている(Pugh,1995,p.228)。IBMは、ポキプシー(Poughkeepsie)研究所でトランジスタ技術の研究を進め、1954年10月には真空管式で四則演算を実行する計算機IBM 604 Electronic Calculating Punch (1948)のトランジスタ化をおこなっている。

この試作機を基礎として開発されたのがIBM 608 Calculator(1955年4月発表、1957年12月出荷)である。IBM 608は、周辺回路も含めて完全にトランジスタ化された最初の商用マシンであり、3000個以上のトランジスタを使用していた。IBM 608はトランジスタ化により、同性能の真空管式の計算機と比べて容積を約半分に、消費電力を90%削減することができた。

電子計算機におけるトランジスタの利用に関するIBMの興味深い試みの一つは、ストレッチ(Stretch)プロジェクトの中で1955年に開発されたStandard Modular System(SMS)カードである。SMSカードは、プリント基板上にトランジスタ、ダイオード、抵抗、コンデンサなどを配置した図13に示したような形状のもので、IBM7000シリーズおよび1400シリーズで使用されている。様々な種類のSMSカードが製作されたが、基本的には16端子で2.5インチ×4.5インチという同一サイズであった(図11はsingle幅のカードであるが、その倍のdouble幅のカードもある)。

日本における最初のトランジスタ式電子計算機は、電気試験所電子部が1954年より開発を開始し1956年7月に始動に成功した小型の実験機ETL Mark IIIである。点接触型トランジスタの発明は1948年、接合型トランジスタの発明は1951年であったが、トランジスタは真空管よりも高価でなおかつ不安定な部品であったこともあり、日本でもトランジスタを用いた電子計算機の開発開始は1950年代中頃となったのである。

ETL Mark III(1956)の主要構成要素は、点接触型トランジスタ130個、ゲルマニウム・ダイオード1800個であったが、そのCPUの大きさは $85\text{cm} \times 44\text{cm} \times 53\text{cm}$ と現在のマイクロプロセッサと比べると極めて大きかった(Takahashi,1986,p.148)。マイクロプロセッサの登場に至るまではまだICやLSIに関わる技術発達を必要としたのである。

図13 IBM の Standard Modular System(SMS)カード

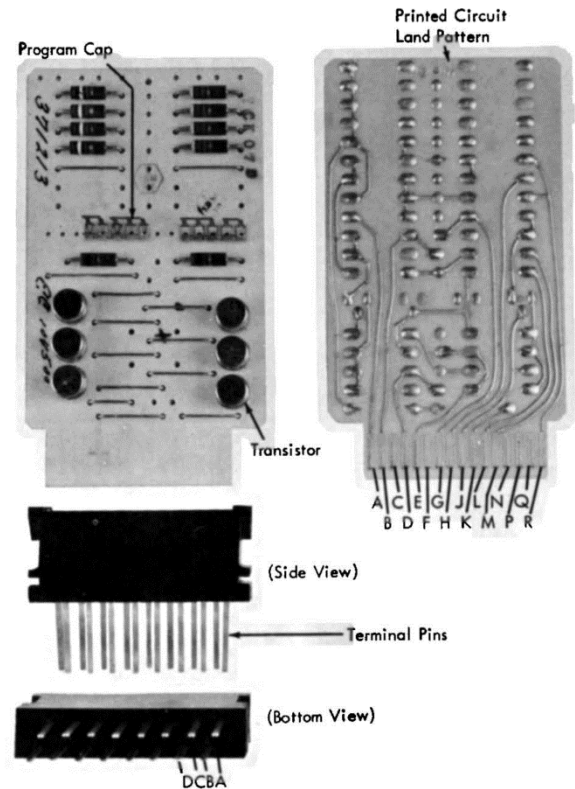


Figure 26. sms Printed Wiring Cards Single Card and Socket

[出典]IBM(1992)p.18

電気試験所はETL Mark III(1956)に引き続きトランジスタ式電子計算機の実用化のための研究開発を1956年10月より始め、一年後の1957年11月には後継機のETL Mark IV(1957)を完成させている。Mark IVは、接合型トランジスタ470個、ゲルマニウム・ダイオード4600個と前世代機よりかなり増加させたこともあり、そのCPUの大きさは140cm×20cm×120cmとさらに大きくなった(Takahashi,1986,p.150)。

Mark IVは、トランジスタを点接触型から接合型に代えたことにより、加算・減算の平均所要時間は $560\mu\text{s}$ から3.4msへ、乗算の平均所要時間は $768\mu\text{s}$ から4.8msへと数倍以上も計算速度は遅くなった(Takahashi,1986,p.148およびp.150)ものの、トランジスタ素子の安定性・信頼度は向上し、Mark IIIに比べてはるかに安定稼動した。

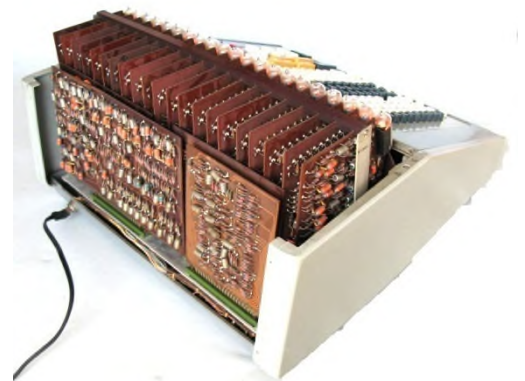
そうしたMark IVの成功などもあり、日本電気のNEAC 2201(1958)、NEAC 2203(1959)、日立のHITAC 301(1959)、HITAC 102(1960)、松下通信工業のMADIC I(1959)、MADIC IIA(1961)、沖電気のOKITAC 5080(1960)、OTC 6020(1960)、東芝のTOSBAC 3100(1960)、三菱電機のMELCOM LD1(1960)、MELCOM 1101(1960)、北辰電機のHOC100(1958)、HOC200(1960)など数多くの民間企業が1950年代後半にトランジスタ式電子計算機の開発に取り組んでいる。

d. 電子的 calculator における真空管からトランジスタへの演算素子のイノベーション

トランジスタが安定して製造されるようになると、calculator の分野においても真空管からトランジスタへの移行が進められた。

1964 年にはシャープが世界初のオールトランジスタ式電子計算機「コンペット CS-10A」の開発に成功した。コンペット CS-10A は、ゲルマニウム・トランジスタを530 個、ダイオードを2300 個用いて作られており、金銭登録機ほどの大きさで机の上に置いて用いることができたが、重量は25kg もあった。10 桁の計算を行い、入力には各桁に10 個のキーが配置された当時の金銭登録機と同じフルキー方式であった。電動計算機よりも計算速度が速く、計算時に振動音が発生しない点がメリットであったが、まだ価格は535,000 円と高かった。

図14 コンペット CS-10A の内部の写真



[出典]<http://www.dentaku-museum.com/calc/calculator/sharpd/cs10a/inside/5.jpg>

e. 電子的計算機の演算素子に関する日本独自のイノベーション ---- パラメトロン計算機 computer タイプのパラメトロン計算機

エラー！参照元が見つかりません。には記載していないが、日本人の発明になる日本独自タイプの演算素子にパラメトロン(Parametron)がある。パラメトロンを演算素子や記憶素子として利用した computer の開発が日本では1950 年代後半に積極的に進められた。

20 世紀中頃における computer の研究開発において、日本では演算素子としてリレー、真空管、トランジスタと並んでパラメトロンが利用されたのである。

パラメトロンとは、「計算機に必要な三作用、即ち記憶、論理演算、増幅がすべてこの一つの素子によってできる」(高橋秀俊,1968,p.3)という特徴を持つ素子であり、後藤英一が1954 年に考案したものである⁽¹¹⁾。パ

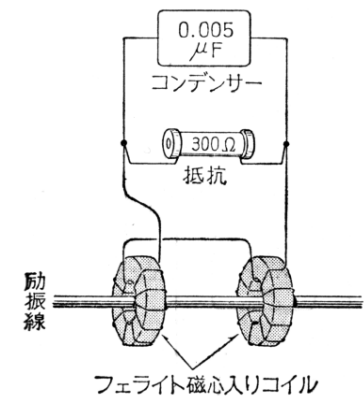
(11) フォン・ノイマンも、パラメトロンと同様にパラメーター励振を利用した素子を考案し、アメリカで特許出願をしている(米国特許番号2815488、特許譲受人IBM)、このフォン・ノイマンの特許申請は、1954 年4 月28 日で後藤英一の特許申請より

ラマトロンは、フェライトの環状磁心にコイルとコンデンサーを組み合わせた共振回路をもつ電氣的な回路素子であり、機械的可動部を持たないというその構造から言えば、パラマトロンを演算素子として利用した計算機は電子的計算機の系列に位置づけることができる。

パラマトロンは、その発明当時の対抗技術である真空管と比べ構造が簡単で信頼度が高く⁽¹²⁾、コスト的にも安かった⁽¹³⁾ことや、リレーよりも高速であったことなどから、電電公社電気通信研究所の Musashino-1(1957)⁽¹⁴⁾、Musashino-1B(1960)、東大の PC-1(1957)、PC-2(1960)、日立の HIPAC MK-1(1957)、HIPAC101(1960)、HIPAC103(1961)、富士通の FACOM200(1958)、FACOM212 (1959)、NEC の NEAC1101(1958)、NEAC1103(1960)などいくつものパラマトロン計算機が製作されている。

パラマトロン計算機は、それと同時代のリレー式計算機や真空管式電子計算機よりも優れた面を持っていたが、真空管の次世代技術であるトランジスタに比べて集積度・速度・消費電力の点で劣っていた。

図15 パラマトロン素子



[出典] 高橋秀俊(1972)p.59

例えば高橋茂(1996,p.12)は、電気試験所でトランジスタ式電子計算機の開発に取り組もうと計画していたグループがパラマトロン採用をもちかけられ、その性能をチェックした時に、「原理はおもしろいけれども、トランジスタに比べていかにも動作が遅く、消費電力が大きいことを実感し…最初の計画通りトランジスタで進むことを決めました」と書いている。

実際、トランジスタ式電子計算機の ETL Mark III(1956)は 300W、ETL Mark IV(1957)は 550W と小さかった(Takahashi,1986,p.148 および p.150)のに対して、パラマトロン計算機の Musashino-1(1957)の消費電力は 4.76kW(Muroga&Takashima,1959,p.315)と大きかった。

温度特性の優れたシリコントランジスタの登場など 1960 年代におけるトランジスタ技術の進展の結果として、

も一ヶ月前であった。ただしフォン・ノイマンは真空管に対抗できる高速動作を目的としていたこともあり、その特許申請はマイクロウェーブ(1,000MHz~10,000MHz)によるものであった点で、励振電流の周波数を 2.3MHz とした後藤英一のパラマトロンとは異なっていた。また特許申請書に原理的な解説はあったが、具体的な設計についての記述や図面はなかった。

高橋秀俊(1972,pp.81-82)は、パラマトロンの特許出願をドイツにした時にフォン・ノイマンの特許との類似性を指摘され、アメリカの特許を調べて「まさに原理的にはわれわれのパラマトロンと同じであり、しかもむこうのほうが、たった一月だが早く出願されていることがわかり、非常に驚いた」としている。なお、Muroga & Takashima(1959)論文のレフェリーも、パラマトロンとフォン・ノイマンとの類似性を指摘している。

(12) 点接触型トランジスタを演算素子として利用した日本最初のトランジスタ式電子計算機 ETL Mark III(1956)の開発に携わった高橋茂は、「困ったのが点接触型トランジスタの劣化でした。…昨日取り替えたばかりのトランジスタがもう故障だなどということもしばしば」(高橋茂,1996,p.13)であったと当時の点接触型トランジスタの信頼度の低さを証言している。また真空管の信頼度の低さに関しては、高橋秀俊が真空管式電子計算機に関して真空管を「毎朝テストして、何本か不良品を取り替えるというのが常識だった」(高橋秀俊,1979,p.143)と証言している。

(13) パラマトロン開発を主導した高橋秀俊は、「パラマトロンは…安価で、安定な部品だけから組み立てられていること、そして、これ一種で完全な論理回路が組めるということが特徴で、特にまだトランジスタが非常に高価であった当時、価格の点でまったくユニークなものと思われた」(高橋秀俊,1968,p.3)としている。実際パラマトロン計算機の開発開始時点の 1954 年当時で、パラマトロン素子は一素子あたり約五百円という低価格であったが、「同じだけのものを真空管でつくれば、安く見積もって一万円はしただろう。トランジスタにいたっては当時は 1 個が数千円もした」(高橋秀俊,1972, p.62)のである。ただしパラマトロン計算機の完成時点の 1957 年頃には「トランジスタ素子の速度はずっと速いので…結局、価格の点ではそれほど違わない」(高橋秀俊,1972,p.62)という結果になっていた。

(14) Musashino-1 は 1957 年 3 月に運転開始した日本最初のパラマトロン計算機であるが、7400 個のパラマトロン(制御装置用 1600 個、算術演算装置用 2800 個、磁気コアメモリ用 1000 個、磁気テープメモリ用 2000 個)とともに、679 本の真空管(算術論理演算装置用 280 本、磁気コアメモリ用 239 本、磁気テープメモリ用 160 本)も使用されており(Muroga&Takashima,1959,p.309)、いわばハイブリッド型の電子計算機であった。

トランジスタに対するパラメトロンの大きな利点であった信頼度が「あまり大きな特色とはいえなくなった」(高橋秀俊,1968,p.3)結果として、「パラメトロンは日本の電子計算機工業にとって大きな道草であった」という批判(高橋秀俊,1968,p.iii)が 1960 年代後半には見られるようになった。

集積度・速度・消費電力の点で劣るだけでなく、信頼度の点でもさほどの性能差別化が確保できなくなったパラメロン計算機は、1960 年代末には「現在の所、大型機には明らかに不利、中型機にはあまり有利ではない」(高橋秀俊,1968,p.18)という事態に直面することになった。

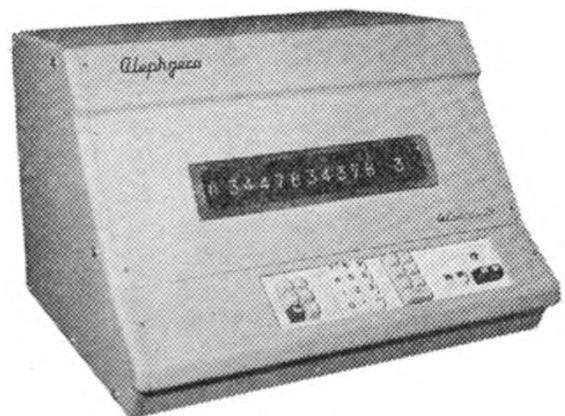
価格の問題に関しては、1960 年代後半の時点でもなお「パラメロン素子の価格をトランジスタによる相当論理素子と比較する場合、**速度のことを問題にしない限りパラメロンの方が格段に安いことは間違いのない事実**」(高橋秀俊,1968,p.17)であったから、小型機に関してはまだ可能性があると考えられていたが、トランジスタの相対的な低価格化、IC や LSI の登場の結果として、結局のところパラメロンは技術的主流になることがなく、日本独自の技術としての位置づけに止まった⁽¹⁵⁾。

calculator タイプのパラメロン計算機

パラメロン素子を使った計算機械は、computer タイプ日本では 1963 年にパラメロン素子を使った電卓アレフゼロ 101 が大井電気から発売されている。

大井電気は、電電公社電気通信研究所のパラメロン電子計算機 Musashino-1(1957)のパラメロン素子の製作を依頼されて供給していたことから、同素子を使った電卓の開発に取り組み、1963 年 8 月には試作機の電卓アレフゼロ 101(1 号機)の開発に成功した。約 1700 個のパラメロンを用い、表示・演算桁数は 10 桁で加減算、乗算、除算、開平、開立等の計算ができた。

大井電気は 1964 年 4 月にはアレフゼロ 101(2 号機、消費電力 300W、550×520×380mm、価格 80 万円、加減算 10 桁 乗算 20 桁 除算 10 桁(剰余 10 桁)、開平 9 桁)を、また後には 3 号機も出し総計約 1,000 台のアレフゼロ 101 を製造・販売したが、消費電力が大きいことや地磁気の影響を受けやすかったことや、シャープやキャノンなど競合他社から販売されていたトランジスタ式電卓の著しい信頼性のアップ、小型化、大量生産化による低コスト化などの結果として相対的競争優位を確保することができず、1970 年には電卓販売から撤退を余儀なくされている。



[図の出典]電卓博物館のWebページ
<http://www.dentaku-museum.com/calc/calc/31-kokunai/kokunai1/alepfzero/alepfzero/b-1.jpg>

(5) 計算技術の歴史的発展構造とマイクロプロセッサ

「計算」作業を実行するための道具や機械としての計算技術は、その個別的演算の実行に関して、他の機械的技術の場合と同じく、①「作業」要素関連の技術発達の先行、②「動力」要素関連の「後追い」的技術発達、③「作業」要素関連の次なる技術発達による新しい発展、というような 3 段階

(15) この点に関してはパラメロン計算機の開発において主導的役割を果たした高橋秀俊自身も、素子の物理的特性から考えてパラメロンよりもトランジスタの方が技術的可能性の点で優れていることは認めていた。「トランジスタ技術が一定のレベルまで進歩すれば、パラメロンが第一線から退場せざるを得なくなるのは、当然のことであった」とし、「そのことは当初からある程度は予想したことであったが、IC、LSI の時代がこれほど早く来るとは誰も予想しなかった」(高橋秀俊,1972,pp.83-84)だけであると述べている。

の螺旋的発展構造を持っている。

「計算」作業を担う演算素子に関して、そろばんや abacus などにおける「玉」から、「歯車」への移行により計算作業の機械化が可能になった。そして計算作業の機械化により、複数の演算を連続して自動的に実行処理することが原理的には可能となった。そうした演算の連続的処理およびプログラム処理を実行するマシンを最初に構想し設計したのが 19 世紀の Babbage である。

「作業」要素関連の「玉」から「歯車」へという先行的な技術発達に続いて、演算作業を担う歯車を動かすための動力に関して、演算の連続的自動処理をおこなう歯車式計算機における「人間動力」から「蒸気動力」へのイノベーション、あるいは、個別的演算を断続的に実行する歯車式計算機における「人間動力」から「電気動力」へのイノベーションというように、「動力」要素関連の技術が「作業」要素に対して「後追い」的技術発達を遂げたのである。

「歯車」式計算機よりも高速な計算を可能にするために考え出された「作業」要素関連の技術的発明が、電磁石の磁力を利用したスイッチ機構のリレーであり、リレーを演算素子とする computer も実際に製造された。しかしながら「リレー」式計算機も「歯車」式計算機と同じく機械的機構を利用する点においては変わりがなく、計算速度や計算実行時の騒音に関して機械的計算機に固有の限界を持っていた。

そうした機械的計算機の限界を超える技術的発明が、「演算」素子の電子化である。「演算」素子を機械的機構から電子的機構へと変えることで、計算速度の向上だけでなく、プログラムによる動作が現実的なものとなった。これにより四則演算の個別の実行を主とする calculator と、四則演算の連続的実行だけでなく条件分岐などのプログラム動作も可能な computer の製品区分が生じることになった⁽¹⁶⁾。

一方で、電子的な「演算」素子に関しては、「真空管」→「トランジスタ」→「IC」→「LSI」というような発展を遂げた。こうした技術発展により演算速度の向上、演算素子の軽量化や小型化が進展した中で、computer 系列の技術開発からではなく calculator 系列の技術開発の中から CPU のマイクロプロセッサ化が 1970 年代初頭に実現することになったのである。

(16) calculator や computer をどのように定義し区別するのかに関しては様々な立場が存在する。例えば星野力(1995,p.8)は computer を「プログラム可変内蔵方式」計算機と定義し、アタナソフとベリーによる ABC も、ENIAC も computer ではない、としている。

本稿ではそうした computer にのみ注目した理論的論争を取り扱うことはせずに、計算技術の二つの発展方向としての calculator と computer の相対的区別に必要な限りで理論的定義を問題としている。すなわち、四則演算の個別の実行機能に限定されたマシンを calculator の典型とし、四則演算と論理演算をともに実行でき、条件分岐も含むプログラム制御が可能なマシンを computer の典型とする立場から、記述をおこなっている。

参考文献および補注

[英語文献]

Ada, A.(1843) “Note A” in Richard Taylor ed. (1843) *Scientific memoirs, selected from the transactions of foreign academies of science and learned societies, and from foreign journals*, Richard and John E. Taylor, Vol.3, pp.691-701

解析機関に関するイタリアでのバベッジの講演について Federico Luigi Conte di Menabrea が書いた記録の英訳 Menabrea, L. F. “Sketch of The Analytical Engine Invented by Charles Babbage”, in Richard Taylor ed. (1843) *Scientific memoirs, selected from the transactions of foreign academies of science and learned societies, and from foreign journals*, Richard and John E. Taylor, Vol.3, pp.666-690 に対して、Augusta Ada King, Countess of Lovelace (1815–1852)が付した注である。この Note A の中の p.696 で Ada が解析機関について、“the Analytical Engine weaves algebraical patterns just as the Jacquard-loom weaves flowers and leaves”という有名な文章を書き記している。

なお Google ブックスより pdf ファイルとして全文ダウンロード可能である。

Babbage, C. (1864) *Passages From the Life of a Philosopher*, Longman, Green, Longman, Roberts, and Green

http://djm.cc/library/Passages_Life_of_a_Philosopher_Babbage_edited.pdf、あるいは、Google ブックスより全文ダウンロード可能

Baldwin, F.S. (1889) *Calculating-Machine*, 米国特許番号 641065(1899 申請、1900 許可) (<http://www.google.com/patents/about?id=XwJ2AAAAEBAJ&dq=641065> よりダウンロード可能)

Bromley, Allan G. (1982) “Charles Babbage’s Analytical Engine, 1838,” *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.4 No.3, pp.196-217(同雑誌の Vol.20 No.4, pp.29-45 に再録されている)

Bromley, Allan G. (1987) “The Evolution of Babbage’s Calculating Engines,” *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.9 No.2, pp.113-136

Bromley, Allan G. (2006) *The Mechanism of Charles Babbage’s Analytical Engine circa 1838*, Basser Department of Computer Science, University of Sydney (<http://www.it.usyd.edu.au/research/tr/tr166.pdf> よりダウンロード可能)

Chase, C.G. (1922) *Operating Means for Calculators*, 米国特許番号 1566650 (1922 申請、1925 許可) (<http://www.google.com/patents/about?id=NftZAAAAEBAJ&dq=patent:1566650> よりダウンロード可能)

Cohen, I.B.(1999) *Howard Aiken: Portrait of a Computer Pioneer*, MIT Press

Dobson, George G. (1918) *Numerical Calculating Device*, 米国特許番号 1426825 (1918 申請、1922 許可) (<http://www.google.com/patents/about?id=L7ZNAAAAEBJA&dq=1426825> よりダウンロード可能)

Eckert, J. Presper (1976) “Thoughts on History Computing,” *Computer*, Vol.9 No.12, pp.58-65[邦訳、J.プレスパー・エッカート「コンピュータの歴史を振り返る」『エレクトロニクス・イノベーションズ』(日経エレクトロニクス・ブックス)日経マグローヒル社、pp.187-201]

Goldstein, Herman H. (1972) *The Computer: from Pascal to Neumann*, Princeton U. P.

Harris, James R. (1999) “The Earliest Solid-State Digital Computers,” *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.21 No.4, pp.49-

IBM(1962) *Standard Modular System - Customer Engineering Instruction-Reference* [Standard Modular System に関する IBM のリファレンス・マニュアル、初版は 1959 年、<http://www.piercefuller.com/scan/ibm-223-6900-2.pdf?id=ibm-223-6900-2> よりダウンロード可能]

IBM(2010) “Feeds, speeds and specifications: ASCC Statistics” IBM Archives > Exhibits > IBM’s ASCC > ASCC Reference room, http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/markI/markI_feeds.html

Intel(2004) *FDIV Replacement Program ; Statistical Analysis of Floating Point Flaw : Intel White Paper*, Section 3: Description of the Flaw” (<http://www.intel.com/support/processors/pentium/sb/CS-013007.htm>)

Irvine, M. M. (2001) “Early Digital Computers at Bell Telephone Laboratories,” *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.23 No.3, pp.22-42

Lavington, Simon(1980) *Early British Computers: the story of vintage computers and the people who Built Them*, Manchester University Press[邦訳、ラヴィントン、S. (末包良太訳、1981)『コンピューターの誕生 --- イギリスを中心として ---』蒼樹書房]

Leipälä, T. (2003) “The life and works of W. T. Odhner, part I,” 2. *Greifswalder Symposium zur Entwicklung der Rechentechnik*, 12. - 14. September 2003

<http://www.rechenmaschinen-illustrated.com/timo%20leipala.pdf> または、www.rechnerlexikon.de/artikel/Life_and_wor

ks_of_W._T._Odhner に再録

Leipälä, T. (2006) “The life and works of W. T. Odhner, part II” *12. Internationales Treffen der Rechenschiebersammler und 3. Symposium zur Entwicklung der Rechentechnik*, pp.55-84

http://www.rechenmaschinen-illustrated.com/timo%20leipala_Odhner_Part%202.pdf に再録

Masch, F. (1929) *Switch Mechanism for Calculating Machines*, 米国特許番号 1837785 (1929 申請、1931 許可)

<http://www.google.com/patents/about?id=QthhAAAAEBAJ&dq=patent:1837785> よりダウンロード可能

Muroga, S.; Takashima, K. (1959) "The Parametron Digital Computer MUSASINO-1" *IEEE Transactions on Electronic Computers*, Vol.EC-8, Issue 3, pp.308-316

Noyce, R.N. (1981) 「集積回路の発展過程 --- プレーナ・プロセスに重点を置いてノイス氏に聞く」『エレクトロニクス・イノベーションズ』(日経エレクトロニクス・ブックス)日経マグロウヒル社、pp.145-157

Pugh, Emerson W. (1995) *Building IBM: Shaping an Industry and Its Technology*, MIT Press

Randell, B. (1st 1973, 3rd 1982) *The Origins of Digital Computers: selected papers*, Springer Verlag

Shockley, W. (1976) “The Path to the Conception of the Junction Transistor,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-23, No.7 (July 1976) pp.597-620 [邦訳、ウィリアム・ショックレイ「接合型トランジスタ発明までの道」『エレクトロニクス・イノベーションズ』(日経エレクトロニクス・ブックス)日経マグロウヒル社、pp.75-109

Swade, Doron D. (2005) “The Construction of Charles Babbage’s Difference Engine No. 2,” *IEEE Annals of the History of Computing*, pp.70-88

Takahashi, Sigeru (1988) “Early Transistor Computers in Japan,” *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.8 No.2, pp.144-154

Williams M.R. (1997) *History of Computing Technology*, 2nd edition, IEEE Computer Society Press

【日本語文献】

相磯秀夫他編(1985)『国産コンピュータはこうして作られた』共立出版

青木洋(2000)「日本の初期コンピュータ開発と国公立研究機関の役割」『横浜経営研究』(横浜国立大学)第 21 巻 第 1・2 号, pp.131-147

臼井健治(1986)『日本のコンピューター開発群像』日刊工業新聞社

日本におけるリレー計算機、真空管計算機、パラメロン計算機、トランジスタ計算機などの開発に関わった数百名の
人々へのインタビューに基づく歴史読み物

内山昭(1983)『計算機歴史物語』岩波書店(岩波新書 黄版 233)

大井電気株式会社(2010)「アレフゼロ 101 (世界初のパラメロン素子を用いた電子式卓上計算機)が重要科学技術史資料
に登録」大井電気株式会社ニュースリリース、2010 年 10 月 6 日

大駒誠一(2005)『コンピュータ開発史』共立出版

岡崎文次(1974)「わが国初めての電子計算機FUJIC」『情報処理』(情報処理学会) Vol.15 No.8, pp.624-632

小田徹(1983)『コンピュータ史』オーム社

河野収(1994)『コンピュータの歴史』同出版社,

サイエンティフィック・アメリカン編(1979)『別冊サイエンス マイクロエレクトロニクス』日本経済新聞社

情報処理学会歴史特別委員会編(1985)『日本のコンピュータの歴史』オーム社

情報処理学会歴史特別委員会編(1998)『日本のコンピュータ発達史』オーム社, 344 頁

付属 CD-ROM に情報処理学会歴史特別委員会編(1985)が pdf ファイルとして収録されている。

タイガー(2002)『タイガー手廻計算器資料館』<http://www.tiger-inc.co.jp/temawashi/temawashi.html>

高橋茂(1996)『コンピュータ クロニカル』オーム社

高橋秀俊編(1968)『パラメロン計算機』岩波書店

高橋秀俊(1970)『電子計算機の誕生』中央公論社

高橋秀俊(1979)『コンピューターへの道』文藝春秋(研究自叙伝シリーズ)

田原総一郎(1992)『日本コンピュータの黎明 ---- 富士通・池田敏雄の生と死』文芸春秋

能沢徹(2003)『コンピュータの発明 ---- エンジニアリングの軌跡』テクノレビュー社

同書 pp.4-5 および pp.24-25 の注 2 に述べられているように、星野力(1995)『誰がどうやってコンピュータを創ったのか?』
に対して批判的な立場から議論を展開している。

ただし ABC マシンの歴史的な位置づけに関しては、星野力とは異なる立場からではあるが、能澤徹も星野力に近い見解である。すなわち能澤徹も、ABC マシンの最大の功績は「真空管による演算器の作動」(能澤徹,2003,p.165)にあるとし、「プログラム制御機構ないしはその概念はまったく存在しなかった」(能澤徹,2003,p.159)ことなどから「コンピュータというには不十分なもの」(能澤徹,2003,p.155)であった、としている。

長谷川裕行(2000)『ソフトウェアの20世紀—ヒトとコンピュータの対話の歴史』翔泳社

星野力(1995)『誰がどうやってコンピュータを創ったのか?』共立出版

ABC マシンの発明の先行性を根拠として、1973 年 10 月 19 日の米国ミネアポリス連邦地方裁判所において電子計算機に関するENIAC 特許が無効とされた。そうしたこともあり、ENIAC ではなくABC マシンが世界最初の電子計算機であるとする見解が最近強い。

これに対して星野力は、星野力(1995,p.81 および pp.141-142)において「プログラム可変内蔵方式」の計算機をコンピュータと定義する立場から、ABC マシンは真空管を演算素子とする電子的な論理回路を構築するなど独創的で先駆的な業績を挙げたものではあるが、プログラム内蔵ではないという意味で世界最初のコンピュータとするのは不適當である、としている。

松下電器 製造・技術研修所編(1978)『制御基礎講座 1 プログラム学習によるリレーシーケンス制御』廣済堂出版

南澤宣郎(1978)『日本コンピューター発達史』日本経済新聞社

コンピュータという用語の意味内容に関して筆者は p.5 で、Electronic Data Processing Machine がコンピューターの内容を最も「正確に表わし、誤解を受けることも少ないと考える」としている。またその日本語訳である「電子データ処理装置」あるいは「電子情報処理装置」も、「やや堅苦しい感はあるが適當ではないかと思う」としている。

横山保(1995)『コンピュータの歴史 ---- 先覚者たち その光と影の軌跡』中央経済社

渡邊祐三(2007)『美 機械式計算機の世界 ---- 手回し計算機を中心として』ブレーン出版

渡邊祐三(2008)『続 美 機械式計算機の世界 -- 手回し計算機を中心として』ブレーン出版

参考＞ネーピアの算木による平方根の計算方法

筆算による開平法での乗算作業にネーピアの算木を用いることで計算作業の効率化を図ることができる。このことを四桁の整数の平方根の場合を例として説明しよう。

まずその準備作業として、開平法のための作業を数学的に分析する。四桁の整数の平方根は二桁の整数となるので、二桁の整数とそれを二乗した数の関係を最初に考えよう。二桁の整数の 10 の位の整数を n_1 、1 の位の整数を n_2 と置くと、二桁の整数を二乗した数である四桁の整数 N は次のように置ける。

$$N = (n_1 \times 10 + n_2)^2 = n_1^2 \times 100 + 2 n_1 \times n_2 \times 10 + n_2^2 \quad \cdots \cdots (1)$$

N として、ここでは $N=5776$ を考えよう。開平法において整数を二桁ごとに区切ること、すなわち 5776 を $57 \mid 76$ とすることは、

$$N=57 \times 100 + 76 \quad \cdots \cdots (2)$$

と書くことに対応する。

式(1)と式(2)の対応関係から考えると、 $n_1^2 < 57$ となる。

整数の二乗の値が書かれた右図の左端の 2 乗の値が書かれた算木の数値から、上記の不等式を満たす n_1 の最大値は $n_1=7$ であることがわかる。

なお、(1)式で $N=5776$ を代入すると

$$\begin{aligned} 5776 &= n_1^2 \times 100 + 2 \times 7 \times n_2 \times 10 + n_2^2 \\ 2 \times n_1 \times n_2 \times 10 + n_2^2 &= 5776 - n_1^2 \times 100 \quad \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

ここでさらに、 $n_1=7$ を代入すると

$$14 \times n_2 \times 10 + n_2^2 = 886 \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。これは開平法における筆算で下記のように書くことを意味する。

$$\begin{array}{r} \sqrt{5776} = 7 \\ \underline{49} \\ 886 \end{array}$$

さて(3)式の第 1 項目の $2 \times n_1$ 、すなわち、(4)式の $14 \times n_2 \times 10$ の最初の項の 14 という数字は、平方根を求める際にネーピアの算木として 1 の棒と 4 の棒を右図のように置くことを意味する。

次に、右図の最左端に書かれた数字が n_2 を意味すると解釈すると、その隣の列にネーピアの算木の 1 の棒と 4 の棒を順に置くことで $14 \times n_2 \times 10$ の乗算を実行することができる。また、整数の二乗の値が書かれた算木を最左端におくことで $+n_2^2$ の和算を実行することができる。

右図の 3 本の算木に書かれた数字の和が 886 になるものを探すと、 $n_2=6$ であることがわかる。

すなわち、

千の位: 0
百の位: $6+2=8$
十の位: $4+3=7$
一の位: 6

となっている。

[なお、 $N=6241$ とおくと、 $n_1=7$ 、 $n_2=9$ となることを自分で確かめてみよう。]

$2n_1=14=1 \times 10 + 4$ なので、1 の算木と 4 の算木が左から順に置かれている。

普通の算木 2 乗の値が書かれた算木

	↓	↓	↓
	1	4	1
2	0/2	0/8	0/4
3	0/3	1/2	0/9
4	0/4	1/6	1/6
5	0/5	2/0	2/5
6	0/6	2/4	3/6
7	0/7	2/8	4/9
8	0/8	3/2	6/4
9	0/9	3/6	8/1

↑ ↑
 $2 \times n_1$ の値 n_2^2 の値が
に対応して 書かれている
算木を置く と解釈する