

# 計算技術の歴史的発展構造

--- マイクロプロセッサ技術の歴史的な位置づけのための基礎的考察 ---

明治大学経営学部

佐野正博

## 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 --- 現代 computer におけるレジスタの祖型としてのそろばんの玉.....	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) 計算「道具」から計算「機械」へのイノベーション --- 歯車を演算素子とすることによる演算作業の機械化.....	4
a. 初期の手回し計算機 --- 手で動かす歯車式計算機.....	5
b. 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) .....	5
c. 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).....	6
d. 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.....	6
(4) 機械的計算機に関する動力のイノベーション(1) --- 蒸気動力駆動の歯車式計算機.....	7
a. 蒸気動力機関で動かす歯車式計算機(1).....バベッジの階差機関.....	7
b. 蒸気動力機関で動かす歯車式計算機(2).....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.....	7
(5) 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歯車式 calculator.....	9
(6) 機械的計算機における、歯車からリレーへの演算素子のイノベーション.....	9
a. リレーを演算素子とする機械的 computer.....	9
b. リレーを演算素子とする機械的 calculator.....	10
(7) 機械的 Computer から電子的 Computer へのイノベーション --- 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.....	10
(8) 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
(9) 電子的 computer 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.....	13
(10) 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.....	15
(11) 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

## (1) はじめに

演算を実際に実行する回路の構成素子(演算素子)の「機械化」は、「そろばんの玉の移動」から「歯車の運動」への移行から始まった。そして「歯車」を演算素子とする機械的計算機は、そろばんの玉と同じく人間の手を動力源とする手動の歯車式計算機を歴史的出発点として、蒸気動力で動かす歯車式計算機、電動の歯車式計算機へと発展を遂げた。演算素子のイノベーションの後に、演算素子を動かす動力源のイノベーションが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のであるが、それは 20 世紀中頃から急速な歴史的発展を遂げた。

まずは、ベル研究所の Mode II(1942) や、ハーバード大学の Mark I(1944)、富士写真フィルムの 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 1940 年代～1950 年代に進行した。

「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として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の実現は、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進歩によってもたらされた。

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」であるが、真空管式電子計算機の研究開発は、リレー式計算機とほぼ同時期におこなわれている。真空管は演算素子として長寿命化・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。

こうした困難の技術的克服を可能にしたのが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」である。二極真空管に代わってダイオードを、三極真空管に代わってトランジスタを回路素子として利用することで飛躍的な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。

以上のような計算技術の歴史的発展構造を図式化すると、表 1 のようになる。以下では、こうした演算素子に関わる技術発展という視点から、計算技術の歴史的発展のあり方および構造を少し詳しく論じることにしよう。

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)				
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	
計算プロセス実行 のための素子 (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) 抵抗器、コンデンサー +配線	トランジスタ (1948) 半導体ダイオード (semiconductor diode) 抵抗器、コンデンサー +配線	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)	電気動力 (リレー動作用)	電気動力 (電気回路の動作用)				
具体例	非プログラム型 計算機 (calculator 的計算機)	そろばん アバカス 計算尺	バスキルの 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	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	カシオ計算機 14-A (1957)	乗算穿孔機 IBM モデル 604 (1947) CPC(カード・ プログラムド・ カリキュレータ)			電卓
	プログラム型 計算機 (computer 的計算機)			バベッジの 解析機関 (1834-)		ベル研究所 Model I (1942) ハーバード大学 Mark I (1944)	ENIAC(1946) EDVAC(構想 1944) EDSAC(稼働 1949) UNIVAC-1 (1951) IBM-701 (1953) IBM-650 (1954) 富士写真フィルム FUJIC (1956)	UNIVAC Solid State Computer (1958) IBM7070 (1960)	IBM360 (発表 1964 年 出荷 1965 年) DEC PDP-8 (発表 1965 年)	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 ---- 現代 computer におけるレジスタの祖型としてのそろばんの玉

現在から 3,000-4,000 年前にそろばんの形態をしたものが存在したと言われている。そろばんは、そのように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 computer と一定の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。すなわち、そろばんの玉は、計算結果を表示する「表示装置」、および、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」という機能を果たす素子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

対数の発見者としても知られているネーピア(John Napier,1550-1617)は、計算作業を補助する道具として Napier's bones (別名 Rabdology)を発明している。Napier's bones の基本的利用法は、表 2 のように算木(九九の乗算結果を分解記入した計算棒)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。応用として、除算の実行や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ておいて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、加算の実行に際してはあらかじめ記憶されている加算表を参照するようになっていた IBM 1620(1959)<sup>(1)</sup>などの 20 世紀の電子計算機や、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たインテルの Pentium プロセッサー<sup>(2)</sup>などでも用いられている。

表2 ネーピアの算木による乗算の計算法

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

446×4 を計算する場合、4 の算木 2 本と 6 の算木 1 本を左図のように順に並べる。  
4 の欄に書かれた数字を下記のように利用して、乗算の結果が 1784 となることを求めることができる。

千の位: 1  
百の位: 6+1=7  
十の位: 6+2=8  
一の位: 4

(1) IBM1620 は、表を用いて加算を実行するため、加算を実行する回路をハードウェア的には持っていなかった。  
(2) インテルの Pentium プロセッサーが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ることは、計算表のデータの一部が誤っていたために誤動作を起こすというバグを持ったマイクロプロセッサーをインテルが出荷し、製品リコールに追い込まれたことで周知の事実となった。このバグの「問題の原因は、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」(The cause of the problem traces itself to a few missing entries in a lookup table used in the hardware implementation algorithm for the divide operation)」(Intel,2004)ことになった。

**c. 計算尺(17世紀) --- アナログ型計算を実行するための道具**

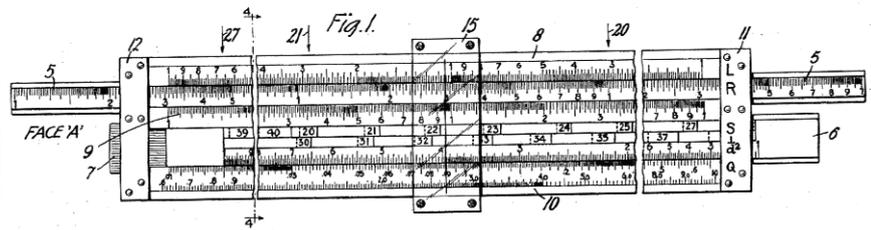
1620年、イギリスのガンター(Edmund Gunter、1581 - 1626)の考案した対数目盛を応用したものが計算尺の原型と言われている。

$\log AB = \log A + \log B$  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

図1 現代的な計算尺の一例(1918)



[出典]Dobson(1918)

まれていて、一方を滑らせて目盛を合わせることにより、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、1850年頃にフランスのアメデー・マンハイム(Amédée Mannheim, 1831 - 1906)の計算尺と言われている。

そろばんや 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) 計算「道具」から計算「機械」へのイノベーション --- 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。

計算「道具」においては、上記のそろばんに関して考察したように、データの記憶や表示の素子が「道具」として技術的対象となっていたが、加算・減算・乗算・除算などの演算作業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 の CPU が担っている処理機能は人間が担っていた。

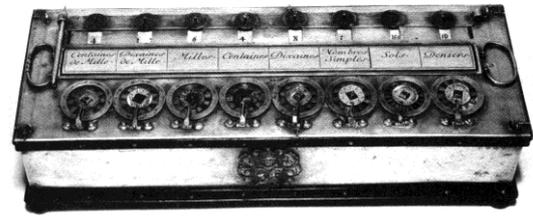
そろばんや Abacus などの計算「道具」には担わせることができなかったそうした処理機能の一部を機械化することが計算技術の次の発展段階を構成している。最初の技術的発展は、「歯車」を演算素子として用いることで加算・減算・乗算・除算などの演算処理を機

械化することが実現された。

**a. 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<sup>(3)</sup>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<sup>(4)</sup>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2 パスカルの計算機(1642)



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

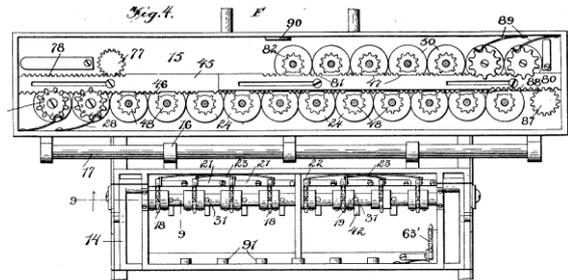
**b. 19 世紀における手回し計算機の実用化--- Charles Xavier Thomas(1820), Frank Stephen Baldwin(1875)**

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と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。

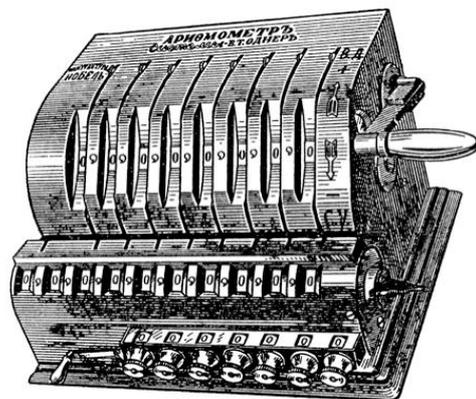
この種の計算機の一応の完成品は、1891 年に売り出されたスウェーデンのオドナー (Willgodt Theophil Odhner,1845-1905)の計算機 Arithmometer である。

図3 ボールドウインの特許申請図(1889)



[出典] Baldwin(1889) Fig.4

図4 オドナーの計算機(1877)



[出典] Leipälä (2003) p.10

(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。9の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。

### c. 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<sup>(5)</sup>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<sup>(6)</sup>、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関わらず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。

### d. 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。

図5 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](http://www.tiger-inc.co.jp/temawashi/img/tmws7111_2.jpg)

(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」をとって「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」タイガー手廻し式計算器資料館 <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。

#### (4) 機械的計算機に関する動力のイノベーション(1) --- 蒸気動力駆動の歯車式計算機

大きな数の計算をしようとすればするほど、歯車式計算機では噛み合わさる多数の歯車の間での摩擦力が大きくなるため、動作させるのにより大きな力が必要となる。そのため、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が19世紀に研究・開発された。

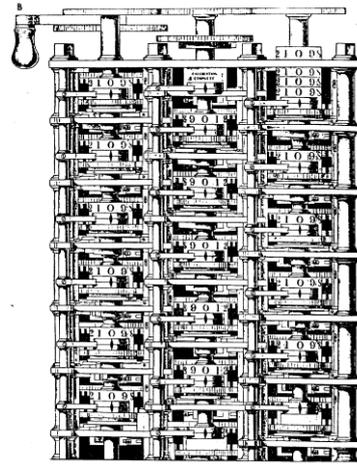
##### a. 蒸気動力機関で動かす歯車式計算機(1)・・・バベッジの階差機関

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6 バベッジの階差機関のモデル



[出典]Babbage(1864) *Passages from the Life of a Philosopher* の扉絵

図7 階差機関の歯車



[出典]Swade(2005)p.71

##### b. 蒸気動力機関で動かす歯車式計算機(2)・・・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

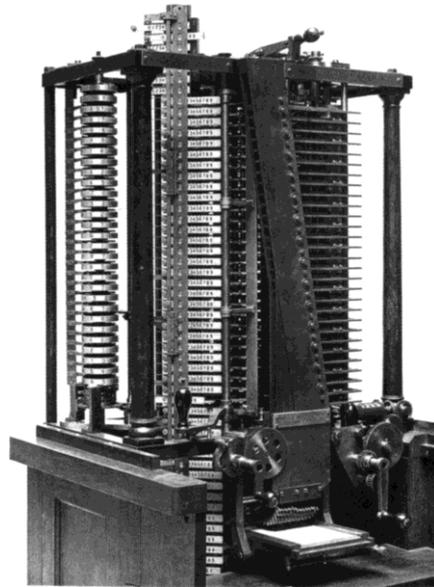
はこれにプログラムやデータを記録させることを考えたのである。いわば解析機関は、カードによって「代数的な模様を織る」機械である(Ada,1843)。バベッジは、Jacquard 織機と解析機関の間には「ほぼ完全なアナロジーが成立する」(Babbage,1864,p.117)としている。なおパンチカードのこうした利用は、1940年代～1970年代の電子計算機において実際になされている。

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<sup>(7)</sup>。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9のような装置である。(図9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。

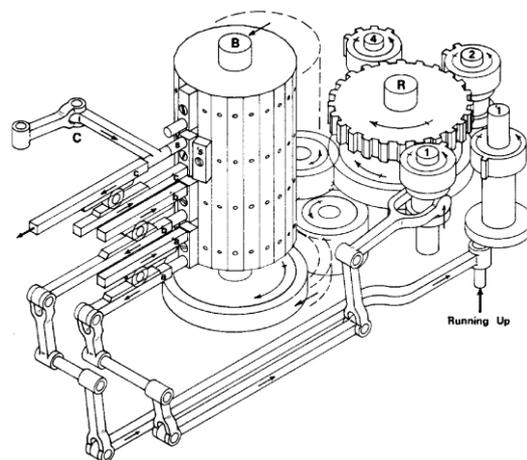
バベッジの解析機関の構想は、当時の技術的制約から実際には完成品としてうまく実現することはできなかった。また歯車を演算素子として利用する機械的計算機ではプログラム駆動において実用的な速度の確保が困難であったと思われるが、バベッジの解析機関の構想にはcomputerの設計思想として現在につながるものがあった。

図8 バベッジの解析機関の一部



[出典]Williams(1997)History of Computing Technology, p187

図9 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

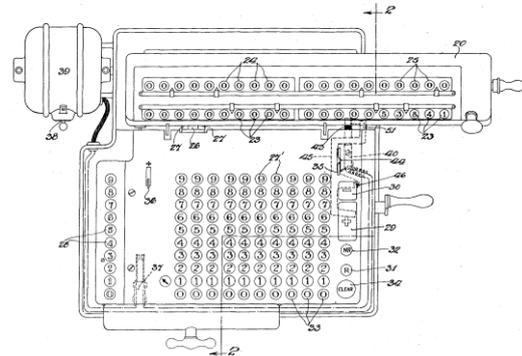
(7) バベッジは Babbage(1864)p.117 においては解析機関が store と mill という二つの部分から構成されているとしているが、本文中にあるように store と mill に加えて、control 装置もバベッジは考えている。

## (5) 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歯車式 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10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10 モンロー社の電動電卓



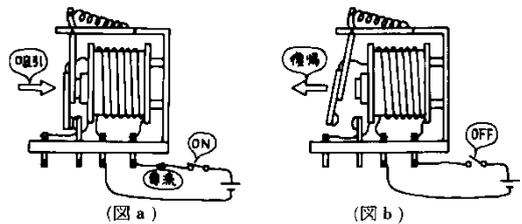
[出典] Masch(1929)の Figure 1(上記の39番が電動モーター部である)<sup>(8)</sup>

## (6) 機械的計算機における、歯車からリレーへの演算素子のイノベーション

### a. 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・オフを機械的におこなう装置である。

図11 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

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ド(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)やリレーを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・

(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。

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。

例えばエイケンが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)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)など真空管式電子計算機が登場した後に、リレー式計算機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)はリレー式計算機であったし、その後継機の ETL Mark II(1955、リレー数 22,253 個)もリレー式計算機であった。また富士通は、1950 年代には真空管式電子計算機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計算機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計算機の研究開発・販売をおこなっている。

## b. 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計算機「カシオ 14-A」(消費電力 300W、重量 140kg)を完成させ 485,000 円で販売を開始した。高速に 14 桁の計算をした「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が採用されていた。なおテンキー方式を採用したのは、卓上型計算機として数値入力部の大きさを小さくするためである<sup>(9)</sup>。

リレー式電子計算機としての computer では 22,253 個ものリレーを利用した ETL Mark I I(1955)などに見られるように多数のリレーが使用されていたのに対して、普通の事務所での使用を想定した calculator として小型化を実現するために、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。

## (7) 機械的 Computer から電子的 Computer へのイノベーション --- 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

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

---

(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。

(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して位置づけることはできない<sup>(10)</sup>。

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。

## (8) 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. Grimdsdale)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

---

(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。

Metrovick 950 を 1956 年に 6 台完成させている(Lavington, 1980,p.48,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 Comput er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)であり、このマシン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、コンデンサーなどを配置した図12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。

図12 IBM の Standard Modular System(SMS)カード

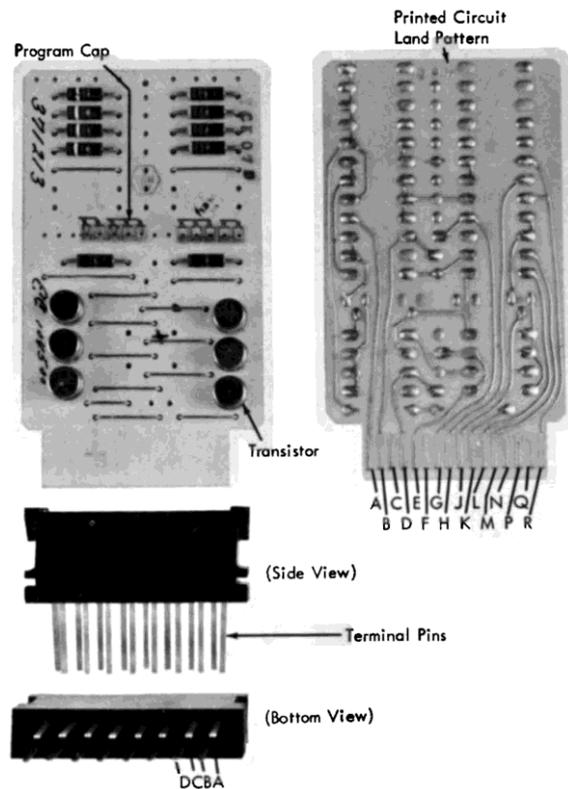


Figure 26. sms Printed Wiring Cards Single Card and Socket

[出典]IBM(1992)p.18

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85cm×44cm×53cm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。

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個と前世代機よりも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 $\mu$ sから3.4msへ、乗算の平均所要時間は768 $\mu$ 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。

## (9) 電子的 computer 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

表 1 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<sup>(11)</sup>。パラメトロンは、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、パラメ

---

(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日以後藤英一の特許申請より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メ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、パラメ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メ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、パラメトロンとフォン・ノイマンとの類似性を指摘している。

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。

パラメロンは、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<sup>(12)</sup>、コスト的にも安かった<sup>(13)</sup>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)<sup>(14)</sup>、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メロン計算機が製作されている。

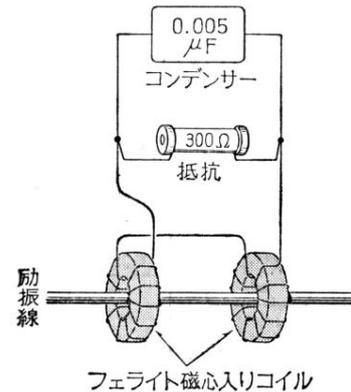
パラメロン計算機は、それと同時代のリレー式計算機や真空管式電子計算機よりも優れた面を持っていたが、真空管の次世代技術であるトランジスタに比べて集積度・速度・消費電力の点で劣っていた。

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メ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、パラメロン計算機の 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、トランジスタに対するパラメ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

図13 パラメロン素子



[出典] 高橋秀俊(1972)p.59

(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) パラメロン開発を主導した高橋秀俊は、「パラメロンは・・・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。実際パラメロン計算機の開発開始時点の 1954 年当時で、パラメ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。ただしパラメロン計算機の完成時点の 1957 年頃には「トランジスター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変わらない」(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メロン計算機であるが、7400 個のパラメロン (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。

いえなくなった」(高橋秀俊,1968,p.3)結果として、「パラメ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か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。

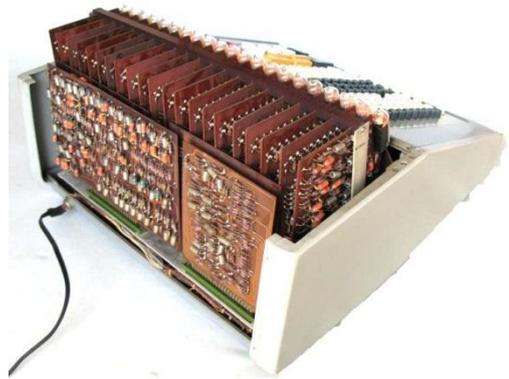
価格の問題に関しては、1960年代後半の時点でもなお「パラメロン素子の価格をトランジスタによる相当論理素子と比較する場合、速度のことを問題にしない限りパラメロンの方が格段に安いことは間違いのない事実」(高橋秀俊,1968,p.17)であったから、小型機に関してはまだ可能性があると考えられていたが、トランジスタの相対的な低価格化、ICやLSIの登場の結果として、結局のところパラメロンは技術的主流になることがなく、日本独自の技術としての位置づけに止まった<sup>(15)</sup>。

## (10) 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/calculator/sharpd/cs10a/inside/5.jpg>

## (11) 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、

(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)だけであるとしている。

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<sup>(16)</sup>。

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。（この点については次章で詳しく論じることとする。）

本報告書は、こうした CPU のマイクロプロセッサ化のプロセスを歴史のおよび技術論的視点から考察するとともに、マイクロプロセッサ技術の発展によって可能となった製品としてのパーソナル・コンピュータ（以下で PC と略記）技術の歴史的発展を論じようとするものである。

---

(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、アタナソフとペリーによる 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

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。

Google ブックスより pdf が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](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. (1899) *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=L7ZNAAAAEBAJ&dq=1426825> よりダウンロード可能)

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](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\\_works\\_of\\_W.\\_T.\\_Odhner](http://www.rechnerlexikon.de/artikel/Life_and_works_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](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

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

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

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

内山昭(1983)『計算機歴史物語』岩波書店(岩波新書 黄版 233)

株式会社タイガー(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)『パラメトロン計算機』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)

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

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

松下電器製造・技術研修所(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