

電 子 計 算 機

— 渡 邊 勝 —

電子計算機は数値計算法を電子的に実行するという原理にもとづいているが、最近世界各国がその試作研究に力を入れている理由は

1. 高能計算機であること
2. 他に比較するものがない高速度であること、
3. 問題を解く手順が一度作られると、以後くり返し使用する時に人手がいらないこと

などで自動高速度計算機の理想に近づいたものだからである。本文はそのあらましの性能を解説したものである。

1. 電子計算機はなぜ大切な

工學の研究を行うには實物について測定を行うことが望ましい。けれどもそれを實行することが困難なこともあり、またいろいろの條件を變えて行いたい場合も多い。設計のときにできる限り検討を加えておくほうが、でき上つた實物について調べるよりも賢明であり、經濟的であることもいうまでもない。

實物をそのまま真似た小さなモデルを作つて實驗をする方法もよく行われる。船の水槽や、飛行機の風洞、橋や建物のモデルについての力學的な實驗がそれである。

また自然の中には、ちがつた現象でありながら同じ數學的な法則で記述できる現象があつて、一方を調べて他を類推することができるという都合のよい場合もある。ワタに張つた石けん膜の形から、材料の彈性的な性質を調べることなどはそのよい例であろう。

だが、現在の工學の基礎になつてゐる物理法則はすでに確立されているのだから、その法則をあらわす方程式から計算によつて答えを求めて、結果を豫想することはできるはずで、それには實驗裝置も測定道具もいらず、一番賢明で安上りの方法だということになる。それならばどうしてそんなうまい方法がこれまで十分に活用されなかつたかといへば、もとになる式から答えを導くまでの計算が、ごく少い例外を除けば、ほとんど實行不可能といつてよい程、手間のかゝるものだつたからである。

最近建設中のアーチ形のダムの設計計算はある一つの形のものについての計算だけで数ヶ月を要するという。

だが最近の進歩した自動計算機のおかげで、この事情は全く一變してしまつた。自動計算機の建設にはかなりの費用を要することはたしかであるが、一たび完成して活用されるならば、機械工學、電氣工學から化學や生物

學の分野にいたるまで、およそ數式であらわし得る科學的問題であるならば、一臺の自動計算機によつて解決されないものは一つもない。

その上自動計算機、とくに電子計算機の計算速度は人間がやれば一生かゝる計算が一日くらいでできる程度のものであるから、その實用價値はますます高いといえる。電子計算機の進歩によつて 20 世紀の人間社會には、ちやうど石炭や電氣のエネルギーを利用することによつて、人間の勞働力が解放された産業革命の歴史と同じように、今度は人間の頭腦勞働よりの解放という新しい革命がはじまろうとしている。そのおよぼす影響力は工學や科學の分野にとどまらず、政治や經濟の進歩にともなつて、それらの問題も電子計算機によつて解決されていくことが豫想できるが¹⁾、これは將來の課題として残しておくことにしよう。

自動計算機も最初の頃は電子的ではなく、機械的なもの（ハーバード大學の一號計算機、1944 年）²⁾、リレー式（ベル電話研究所 1946 年）などがあるが、今ではほとんど電子計算機だけになつてきた。その建設の費用も約 10 萬ドル程度であらうといわれている。

電子計算機は第二次大戰後急速に發展したもので、アメリカ、イギリスを主として世界各地で數十臺も製作され、すでに實用になつてゐるものもある。最近モスコでアジアやヨーロッパに電子計算機を備えた計數センターを作ろうという提案があつて、昨年 11 月下旬に開かれた國際會議に日本からも山下教授が出席されたことは讀者にも耳新しいニュースであつたことと思う。（本號に同教授のバリ通信として會議の模様を報告していただいた 40 頁）。

さしあたり、このような電子計算機はどんな性能をもつてゐるのか、どんな風に計算が行われるのであろうか、またどんな研究が必要なのか、といつた點を述べることにしよう。

2. 電子計算機の原理

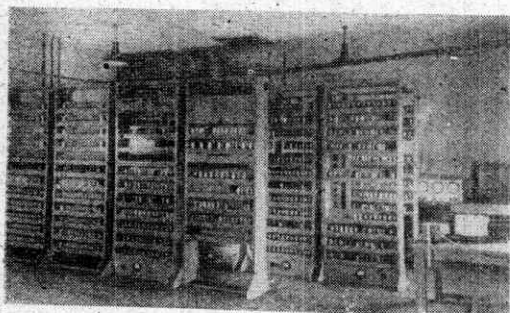
電子計算機の計算原理はどのようなものであろうか。電子で計算をするといつても、電子現象を利用した真空管（電子管）がその主な構成の要素になつてゐるのであつて、數値そのものは電氣的インパルスで傳達される。そしてこれがソロバンで勘定する時のように、電子計數裝置で數えられる。

この場合のように數字でもつてあらわすやり方はデジタル (digital) —— 數字的とよばれ、(digit は數字またはケタの意味) 電子計算機はデジタルコンピュータ

ア (digital computer) の一つである。これに對して、この號に紹介された微分解析機や交流計算盤などは、數値を長さ、回轉角、または電圧、電流などのように連続的に變えることのできる何か具體的な量であらわし、その間に $a+b=c$, $ab=c$ というような式が、幾何學的な關係なり、物理法則なりによつて成立しているのである。この自然法則と數學の式との間の相似 (analogy) の關係から、このような計算機をアナログコンピュータ (analogue computer) といつてゐる。

そこで電子計算機ではソロバン、タイガー計算機などと同じように、 $+$ $-$ \times \div などの四則の演算を行う演算裝置がもどになつてゐるだけのことである。しかしどんなむづかしい方程式でも「數値計算法」によつて、結局は四則演算に還元して解くことができる。そのような計算をつぎつぎに人手をわずらわすことなしに實行していくのが電子計算機の特徴であつて、この意味で電子計算機は萬能計算機であるといわれる。どんな方程式でも解けるような巧みな仕掛けがあるわけではなく、上にのべたような數値計算法を忠實に實行できる計算機なのである。

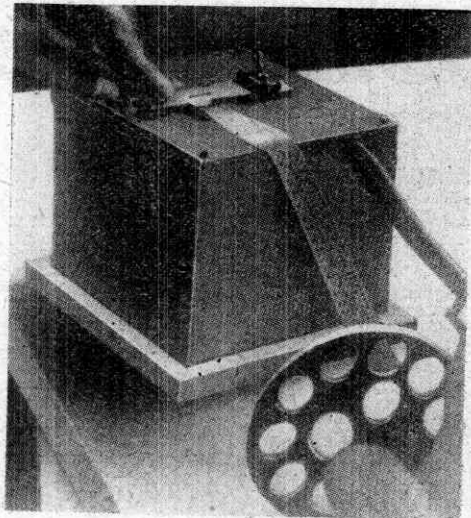
電子計算室 今このような電子計算機を備えている計算センターを訪ねてみよう。こゝには問題を解いてくれる數學者や、計算機を運轉したり、部品を作つたりする技術者がいて、大きな計算室、地下工場、それにいくつかの研究室と實驗室がならんでゐる。こゝに何か問題が持ちこまれると、數學者がその問題をくわしく検討して、



第1圖 電子計算機 (ケンブリッジ大學のエドサク
右手前の上にテープ讀取器 (インプット) とテレプリンター
(アウトプット) がみえる。

電子計算機にかけられるように計算のプログラムを作つてくれる。たとえばその問題は行列式の計算であるかもしれないし、微分方程式を解くことかもしれない。またその計算の途中に \sin や \log の値が必要なこともある。われわれならば、函數表をひいたり、數値計算の公式集をひつくり返して調べてみるが、この計算室による數學者は早速計算プログラムの「圖書室」に出かけていく。こゝは圖書室といつても一冊の本もなく、幾段にも仕切られた戸棚がならんでいて、その引出しをあけてみると、一つづつテープがしまつてあるだけである。數學者はこのテープの群の中から、いり用なテープを探し出す。たとえば算出するテープ、平方根を求めるテープ、または代數方程式を解くテープといった具合に。つまりこのテープは計算のもとになる標準の「種テープ」なので

ある。大きな郵便局に行つて電報を申しこむと、電文通りのモールス記號が長い紙のテープに順々に孔をあけてうちこまれる。つまりこの孔の配置が符號で文字を示しているのだから、これを讀取器に入れたら、その通りの信號が相手の局に電送される。計算テープもこれとよく似ていて、電文の代りに計算の手續きが、いろいろな符號でずつかり打つてある。そこでこの種テープから今解こうとしている問題に必要なものをとり出して、それを骨組みにして一つの問題を解く手順が「編集」されるのである。こうしてでき上つたテープは電子計算室に持ちこまれ、讀取器に送られる。あとは電子計算機にまかせてあげばよい。欲しい答えはテレタイプといつて數字をうち出すテレプリンター (電信印刷器) から、つぎつぎに打ち出されてくる。



第2圖 テープ讀取器
テープは電信用の五ツ孔式のもので讀取には光電管裝置を用いてゐる。

この種テープには電子計算機が解讀できるような言葉が記されているに違ひない。一體それはどんな言葉であろう。この疑問を解くことはしばらく後にして、人間に代つて計算をするという電子計算機そのものはどんな構造になつてゐるのかをまず調べてみよう。

3. 電子計算機の構造と機能

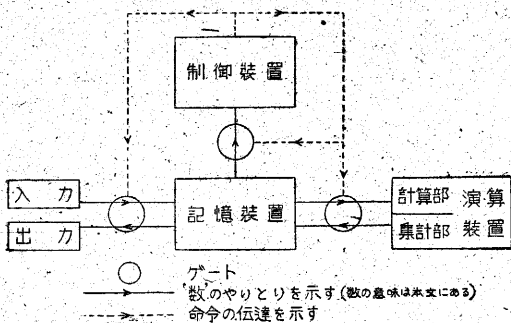
電子計算機は超人的な計算速度をもつた「計算ロボット」といふことができる。生きた人間に頭や手足や内臓があつて、それが神経の働きでうまく調和がとれて活動できるのと同様に、このロボットにもいろいろな器官があつて、それらの巧みな働きでこれまで生きた人間にしかできないと思われていた複雑な計算でも平氣でやつてのけるようになった。そこでこの「計算ロボット」を研究するには、ちょうど醫學で人體の研究をする時と同じように、三つの立場、すなわち身體各部の構造を明らかにする解剖學、各器官の機能を調べる生理學、および器官に故障がおきた場合に原因を調べて治療を行う病理學

に分けて考えるのが自然な方法であろう。

病理学はいさゝか専門の醫者のする仕事であつて、こゝではくわしくはないが、計算ロボットのかゝる病氣には動けなくなつてしまふマヒ症状や、いつまでも同じことを繰り返す神経衰弱症などがあつて、これらに對しては適切な對症療法があることを申しておきたい³⁾。

つぎに電子計算機の解剖圖——といつてもごく大づかみな概念を示すものであるが——は第3圖のようなものであつて、この圖に示す各部分が主な構成單位である。記憶装置や制御装置は電子計算機の頭脳や神経系にもたとえられる部分で、これまでの計算機には見られなかつたものである。

演算装置はいつてみれば電子計算機の中に作りつけられた卓上計算機のようなもので、これだけ取り出して使えば、ふつうの卓上計算機と同じように使える。その中で、計算部は記憶装置からくる數を受けて、加算や乗算を行う所で、その結果得られる和、積などが集計部に記録される。集計部(アキュムレータ)というのは卓上計算機でいえば掛算をした時に積の記録される文字板と思えばよい。



第3圖 電子計算機の概念圖

數の表現 電子計算機の中では、たえずいろいろな數がゆききしているわけだが、それには前にいつたように電氣インパルスとして電線を傳つてゆくのである。數をパルスであらわす方法として、最近の電子計算機でよく使われているように、2進法を用いると簡単である。この場合各ケタは1か0のどちらかで、パルスがあれば1、なければ0として、きれぎれにつながつたパルスの列で一つの數があらわされる。たとえば19を進法に示せば第4圖のようなになる。この際、低いケタが時間的に先にくることは日常數字を読み書きするのと逆である。

入力部からは

前に説明したテ

ープを通じて

‘數’が送られ

てくる。こゝで

‘數’といつた

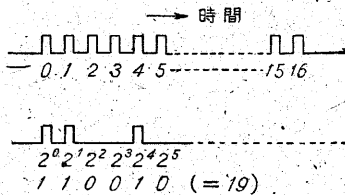
のは、實は意味

があるので、も

ちろん普通の數もふくまれるが、その他に計算機として

大切なのは計算の‘命令’のこともふくんでいるので、

つまり‘數’と書いた時には普通の數と命令の二通りを



第4圖 2進法による數の表示

さすものと考えていただきたい。というのはこの命令も實は數と同じようにパルス列であらわされるものだからである。そしてこれが電子計算機によつて解讀されるので、具體的にどんな命令があるかは今少し計算機の構造を知つてからのことにしよう。

ところで入力部から入つてきた‘數’は一たん記憶装置に記憶される。そこで第1番目の‘命令’がこゝから第3圖に示すように制御装置に送られ、こゝで解讀されその命令に従つて演算(四則演算ばかりでなく、數を移すというようなひろい意味の演算もふくめて)が行われる。第3圖で各装置の間を數が行ききする路は實線で示され、その途中にある丸印はゲートというもので、制御部からくる信號(點線で示してある)によつて開閉される。一種の切換スイッチと考えてよい。これは真空管の格子の作用を利用している。

一つの命令が實行されると、次の命令について同じことがくり返され、これが續いて一計算が完了する。記録すべき計算結果が得られればそれは、記憶装置から出力——すなわち印刷部におくられて印刷される。これは印刷命令によつて行われる。

4. 記憶装置、とくに水銀タンク

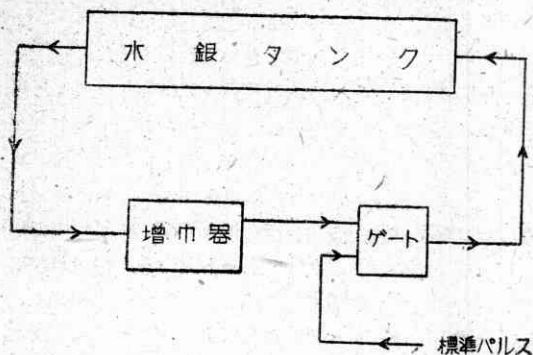
記憶装置は計算機の中心部をなし、技術的にも一番めんどうな所である。こゝは最初に與えられた‘數’を記憶するばかりでなく、計算をすゝめていく際、こゝから‘數’が呼び出され、計算結果はふたたびこゝに記憶される。すなわちこれは‘數’を貯える大きなプールであつて、計算に差支えないように十分なスペースがいり用である。またこれには‘數’を読み取つたり、新たに書きこんだりする装置がついていなければならない。

記憶装置にはいろいろな原理のものがあるが、こゝでは水銀タンクあるいは超音波遅延回路といわれている装置について説明しよう。

これは以前からレーダーなどに實用されていたもので、たとえば太平洋の真中で何も目標がない時に、この装置の中をパルスが通る時間を標準にしてレーダーの校正を行うのが目的で、レダコンと俗によばれている。

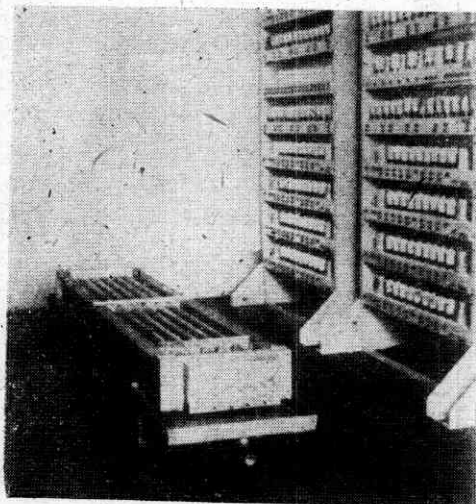
ある長さ(數cm~1m)の管に水銀をつめて、その兩端に水晶片を取りつける。外からくるパルスが水晶片に加えられるとその壓電氣効果で水晶片がひずみを受け、これは水銀中にエチ波をおこす。この波は音波と同じ性質(空氣中の音速よりはるかに早いので超音波という)をもつており、これが向う側の水晶片まで到達すると、そこで水晶をひずませ、再び電氣パルスとなつて水晶片につないだ導線から外部回路にとり出される。水銀中を傳わる時間(約1ミリ秒位)だけおくらせて向う側にとゞくが、これだけでは記憶にならないから、向う側で受けた信號を、外の回路を通じてもとの側にもどす。こうすれば水銀タンクの中にもどるだけのパルス列がグルグルこの回路をまわることになり、記憶——貯數の目的

が達せられる。実際には水銀中を傳わる間にパルスの波形がくずれて弱くなるので、第5圖のように出てきたパルスはゲートを開く信號として使い、ゲートを通してたえず新しい標準のパルスが入るようになってゐる。



第5圖 超音波を用いた記憶回路の原理

この水銀タンクを始めて使つた電子計算機は、ペンシルバニア大學の **Edvac** で、これを使つたおかげで18,000本も真空管を使つた最初の電子計算機 **Eniac** (1946年)にくらべて数分の一も真空管を節約することができた。この成果は大きなもので、續いて同じ水銀タンクを使つて、レミントンランド社の **Univac**、ノースロップ社の **Binac**、NBS (アメリカ國立標準局) の **Seac** などが作られ、イギリスでもケムブリッジ大學で **Edvac** に似た **Edsac**⁽⁴⁾⁽⁵⁾ が作られた。(1948年)



第6圖 16本一組の水銀タンク
下は超音波を用いた記憶装置、右側のパネルは附屬装置。

第6圖は **Edsac** に用いてある水銀タンクで、16本一組にして恒温槽 (温度による音速の變化を防ぐ) に入れてあり、これと同じものがもう一組ある。タンク一本で2進法の16ケタの数 (10進法ならば5ケタに相當する) が32だけ記憶できるから、全部で1024の記憶容量があるわけである。

演算装置にも短かい水銀タンクがあつて、集計部 (ア

キュミュレーター) や、乗數、被乘數の記録部 (レジスター) などは34ケタの長さに相當する水銀タンク記憶装置から成つてゐる。集計部にはこれに電子加算器がついていて、貯數部から送られてくる數 x を、すでに集計部に記録されている數 y に加えて、 $x+y$ をあらためて集計部に記録できるようになつてゐる。

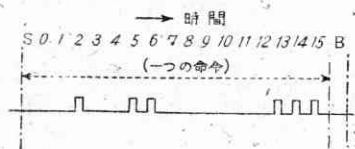
5. 命令とプログラム

Edsac に用いられている命令の一例を示すと、次のようなものがある⁶⁾。

- A n 記憶装置の n 番目の數を集計部 (アキュミュレーター) に加えよ
- S n 記憶装置の n 番目の數をアキュミュレーターから引け
- H n 記憶装置の n 番目の數を乗數レジスターにうつせ
- V n 記憶装置の n 番目の數に乗數レジスターにある數を掛けて、アキュミュレーターに加えよ
- T n アキュミュレーターに記録された數を記憶装置の n 番目にうつせ

たとえば記憶装置の n 番目と m 番目の數の和を、 k 番目に記録するには、3つの命令が必要である。まず **Am**、つぎに **An** によつて和をつくり、これを **Tk** によつて記憶装置にうつせばよい。

命令は數と同じようにパルスの列であらわしておかなければならない。それにはどの命令でも (1) 演算の種類、(2) 指定された記憶場所の二項目があるから、前者をきめる **A, S, T** などを符號化してたとえば **A=11100** というように5ケタの數で示し、後者はその記憶場所の番號をそのまま示しておけば、一つの命令があらわせたことになる (第7圖)。これで數と同じように記憶装置に保存しておく。



第7圖 命令 **A100** を示すパルス

A: 11100 (11~15ケタ)

100=1100100 (0~9ケタ)

S: 2倍の長さの數を示す時使うパルス (通常使用せず)

B: 次の數との切れ目

つぎに少し變つた命令——條件付命令というものがある。これは計算の途中で、得られた計算結果のいかんによつて、次の計算 (命令) に進むべきか、それともちがつた場所の命令、たとえばそれまでの計算をくり返すべきかという岐路に立つた時に用いられる。

En アキュミュレーターにある數が ≥ 0 ならば次には記憶装置の n 番目にある命令を行へ。

0 ならばそのまま次の計算 (命令) を續けよ。

この命令は、チク次近似法などで十分近似が得られたかどうかを判定する場合などにも使われるし、また次に

示す例で考えていただければよく了解されるであろう。

θ を 2π でわつた剰餘を求めるという問題が與えられたとする。 θ から 2π をくり返し引算をして、剰餘が負になる迄繰ればよい。今 θ は記憶装置の 100 番目、 2π が 101 番目にあるものとする、次のようなプログラムを立てればよい。

記憶装置にある命令の順序	命令
1	A 100
2	S 101
3	E 2
4	A 101

これをたどつてみよう。まず θ がアキュムレータにうつされ、次に 2π を引く、その結果が正ならばふたたび命令 2 がくり返され、 2π を引く。それが続けられて残りが負になれば E2 の規約によつて次の命令 4 が行われ 2π を加えて、正しい剰餘がアキュムレータに記録されることになる。

以上はきわめて簡単な例であるが、どんな複雑な計算でもこのようにして命令をよせ集めて實行できることが想像していただけるかと思う。實際、たとえば \sin を算出するには 42 の命令で、 \cos^{-1} ならば 58 の命令のできる、それには級数によつて算出する方法を具體化すればよろしい。

ついでに、こうした計算の速度はどれくらいかという點をいえば、これはパルスの週期が關係するけれども、たとえば Edsac では $1.9 \mu s$ のパルスを用いて、加算、乗算など平均して 1 分間に 15,000 回できる。この記録は人間にくらべて数千倍の早さにあたり、この點が従来くわだておよばなかつた重要な計算を可能にした電子計算機の威大な成果なのである。科學上の計算の目的にはこれで十分であろうが、技術者達はさらにこの記録をはるかに越える努力を続けている。このような早い計算機は、おそらく無線誘導の飛行機を目標に近づけるというような、實際の觀測に結びつけて行われる計算に缺くことのできないものではなからうか。(27.1.17)

文 献

- 1) W.W. Leontief: Computational Problems Arising in Connection with Economic Analysis of Interindustrial Relationships, Proc. Symp. Large-scale Digital Calculating Machinery, Harvard Computation Laboratory Annals Vol. XVI, (1948) 169~175.
- 2) 渡邊壽: 科學 (1952 年) 1 月号 2~10 (岩波書店)
- 3) S. Gill: The Diagnosis of mistakes in programmes on the EDSAC. Proc. Roy. Soc. A, 208 (1951) 538~554.
- 4) M.V. Wilkes: The Design of a Practical High-speed Computing Machine. The EDSAC. Proc. Roy. Soc. A, 195 (1948) 274~279.
- 5) M.V. Wilkes & W. Renwick: The EDSAC—an Electronic Calculating Machine. Jour. Sci. Instr. 26 (1949) 385~391.
- 6) M.V. Wilkes: Programme Design for a High-speed Automatic Calculating Machine. Jour. Sci. Instr. 26 (1949) 217~220.

追 記

本文には、電子計算機のあらましの性能を理解していただくために、主として水銀記憶装置を用いたものについて解説した。電子計算機の發展はそれ以後にも目ざましいものがあつて、それは主に記憶装置に關する新しい考案である。代表的な記憶装置としては、水銀タンクの他に靜電的記憶装置(ストレージチューブ)と磁氣記憶装置(磁氣ドラム)をあげることができる。

ストレージチューブというのは絶縁體のスクリーン(たとえばブラウン管の)をテレビジョンの場合と同じように、細かい素面積に分割して、そのおのおのの荷電の有無によつて 1 が 0 であらわされた數を記憶するものである。この方法は最初 R.C.A. の Rajchman がアイコンスコープ(テレビ用)から着想を得てセレクトロンという複雑な構造の電子管をつくつたのがはじまりで、後にマンチェスター大學のウィリアムスが市販のブラウン管を用いてこの方法を実現させて(1949)以來、非常な注目を浴びた。マンチェスターではフェランティ會社と協力してこの方式の計算機を完成(これには記憶容量を補うため後でのべる磁氣ドラムを併用している)、アメリカでもイリノイ大學、ロサンジエルス國立標準局の SWAC などが採用した。また以上とは別に M.I.T. でもフォレスト博士を中心に、特殊のストレージチューブの試作に成功し、「旋風一號」という巨大な計算機を完成、これは現在同大學のサーボメカニズム研究所において無線防空の計算のために大活躍をしている。(野本氏談) R.C.A. で作つたセレクトロンもプリンストン大學の MANIAC に取り付けられ、數學者ノイマンの指導によつて完成をみた。

磁氣記憶装置は近頃街頭録音や講演會などに使われている磁氣録音器と同じ原理のもので、磁氣ドラムの圓筒面に沿つて、何十本という細かいスジにパルスを磁氣的に記録したものである。この方法は一つのドラムで数千~數萬の數字を記憶できる點で、他の裝置にくらべて、記憶容量がはるかに大きく、従つて計算機の製作費をグッと安くできる。たゞ技術的には相當問題があるように思われる。この裝置の研究はシカゴに近いセントポールの「工業研究團體」で行われて、試作計算機 ERA1101 が完成され、またバロー計算機會社でも TESTRAC という計算機を試作した。このドラムは前にのべたように補助的な記憶装置として、他の裝置と併用される場合も多い。また最近加州マンハッタンビーチにある計算機研究所(會社)で試作されノースロップ社などで使用されているマディダ(MADDIDA)という電子計算機は大きさが事務机くらいしかないマメ電子計算機で昨年ニューヨークの博覽會に出品され、好評を受けた。これが實は磁氣ドラムを記憶装置に用いているので、こういった點で、電子計算機の將來すゝむべき一つの方向を示すものであろう。(27.1.7)