

解説

—日本における計算機の歴史—

パラメトロン計算機 PC-1*

後藤 英一**

1. はしがき

会誌の編集委員会から、日本の電算機の歴史シリーズとして PC-1 のことを書けとの御注文にはたと困惑した。

現在筆者の手許には、PC-1 の図面も写真も一個の部品すらも残っていない。その後、富士通と共同で開発した PC-2 (FACOM-202) ならば、本体は科学博物館にあり、図面の原図も富士通に保存されている。ところが PC-1 となると、筆者の手許に残っている技術的資料は、高橋秀俊先生が編集された“パラメトロン計算機”²⁾ が一冊だけしかない。そこで、この本を読み返して、昔の事を思い出しながら、なんとか本稿をまとめた。パラメトロン計算機開発の経過は上書²⁾ と文献¹⁾ に詳しく記載されている。人の記憶ほど当てにならないものはないなぞとよくいわれるが、筆者もこの点に関しては全く自信がないので、本稿中の誤りや思い違いなど御指摘いただければ幸いである。

2. パラメトロンの開発

東京大学理学部物理学科 (3 年制の旧制最後の組) の最終学年、かねて興味をもっていた電子計算機を研究するため、高橋秀俊先生の研究室に入った。一年上級の山田博氏 (現 富士通) らが大学院におられた。当時の東京大学では、真空管式の電子計算機 (TAC) を作るプロジェクトが進行中であったが、高橋研では TAC に参画するとともに、何千本もの真空管を使う電子計算機などは手許に置けないので、もっと簡単な方式はないものか、というテーマに取組んでいた。その成果の一つに“同期発振型両方向計数器” (高橋秀俊、山田博、電気三学会連合大会 1954 年 4 月) がある。

筆者は、電話用のセレクト・スイッチという機械的手段とエレクトロニクスとを組合わせた“機械電子

式計算方式”を提案し、その一部分も試作された²⁾。筆者はまたフェライトの非直線リアクタとしての性質が利用できないものかとも考えた。フェライトを硬磁性材料 (OP, 磁石) と渦流損失のない軟磁性材料 (オキサイド・コア) として世界最初に実用化したのは、加藤与五郎・武井武の両氏であった。高校時代よりラジオ製作などに凝っていたが、いずれかのアマチュア・ラジオ雑誌で、オキサイド・コアについて知り、大いに興味をひかれてこれを買ってきて、直流バイアス電流の変化による μ の変化を利用して、周波数スイープ発振器を自作し、オシロスコープ (自作) に同期曲線などを描かせて喜んだものである。

このオキサイド・コアの可飽和リアクタとしての性質を計算機に利用できないかと考え始めたのではなかったかと思う。

最初に考えたのは、電磁遅延線の L を変化させて、増幅作用を持たせようということ、遅延回路の方程式をいじくりまわしたが、どうにもうまく結果が得られなかったと記憶している。そのうちに最も簡単な LC 回路の 1/2 分周波発振 (Parametric Oscillation として、文献に記載があった) の位相に記憶作用があることに気が付き、次いで励振の断続によって、増幅作用と多数決に基づく論理演算ができることに気が付きパラメトロンが生れた。実験的には市販の円板状で中央に穴のあるオキサイド・コアで 1/2 分周波発振が起ること、位相による 2 進数字の記憶だけはすぐに確認した (1954 年の春)。

1954 年 7 月には、パラメトロンに関する最初の研究報告を電子通信学会の非直線理論研究専門委員会と、電子計算機研究専門委員会で行なった。その結果は電電公社通研の喜安氏 (現在 岩崎通信機)、国際電信電話の大島氏らに認められ、パラメトロンに関する研究が各所で始められることとなった^{1), 2)}。

この両委員会での発表の内容は、パラメトロンの発振電圧がリアクタンスの非直線性によって振幅制限される機構、動作速度が L の変化率 γ と発振周波数 f の積 γf で決定されることなどの数量的解析と、3 変

* The Parametron Computer PC-1 by Eiichi GOTO (Faculty of Science, University of Tokyo.)

** 東京大学理学部

数以下の論理関数の実現法などの理論的な結果だけで、実験は1/2分周波発振がオキサイド・コアを使って得られたという事実だけであった。

結果論になるが、この実験の成功には偶然的な幸運があった。それは、実験に使ったオキサイド・コアが加藤・武井両氏の開発された銅・亜鉛系フェライトだったことである。諸外国で開発され、日本に逆輸入された、マンガン・亜鉛系フェライトとニッケル・亜鉛系フェライトとは、飽和磁化や高周波特性の諸点で銅・亜鉛系よりも遙かに優れているのであるが、どういふわけかパラメトロン用としては銅・亜鉛系が最良であり、結局実用に供されたパラメトロンはすべてこの系統の材料だけということに終わった。最初に最良の材料に当るといふのは余程の偶然という他ない。

筆者はその後パーマロイ・メッキ線をパラメトロンと磁気ワイヤ・メモリに使うという磁性材料の研究を行なったが、優れた非破壊読み取り特性を持つ、多層磁性線を完成するまでに要した試行錯誤の量を考えると、磁性材料の研究から出発しなくてはならなかったならば、パラメトロンがはたして実現したかどうか疑わしいというのがいつわざる感想である。

パラメトロンを演算素子とする計算機は、PC-1以前にも数多く作られている。例えば、東大高橋研でも十進法のパラメトロン計算機を製作した。(高橋秀俊、和田英一“さん孔テープを使ったパラメトロン自動計算機”電子計算機研究専門委員会1957年1月)。

また、東大と日本電子測器が協同して15桁の十進数のレジスタを15個もつパラメトロン計算機PD-1516が作られた。(高橋秀俊、後藤英一、村上幸雄、山田博，“パラメトロン計算機PD-1516”電子計算機専門委員会，1957年4月)。また、日立製作所のHIPAC-1、日本電気のNEAC-1101、電電公社通研のMUSASHINO-1(後のFACOM-201)などもPC-1以前に完成している。

3. 2周波方式磁心記憶と誤りの訂正できる符号を利用するアドレス選択方式の開発

PC-1にはパラメトロンを使うということ以外に、その記憶装置には表記の全く新しい方法を採用した。2周波方式磁心記憶とは、記憶素子としては通常のコア・メモリと同様に磁心マトリックスを使用するのであるが、その内容の読み取りと書き込みにはパラメトロンを使ったものである。読み取りの原理は、パラメトロンの発振周波数を f として、周波数 $f/2$ の電

流を記憶用磁心に流すと、その残留磁化の方向に応じて、位相が逆転する第2高調波、すなわち周波数 f の電圧が発生するという現象を利用する。書き込みには、周波数 f のパラメトロンの発振電流と、周波数 $f/2$ の電流とを重ね合わせて記憶磁心に流すと、上下非対称の磁場波形が記憶磁心に与えられて、磁化が変化し、しかもその残留磁化の極性は、周波数 f の電流の位相の返転に伴って逆転するという現象を利用したものである。このように二種類の周波数の電流を使うところから2周波法と名付けた。

この記憶装置を実現するには、二つの問題があった。まずその一つは、磁心の上記のような性質は今だかつて利用されることがないものであったので、これに適する磁性材料を探すことであった。そこで東京電気化学工業(TDK)に依頼して、多種多様の材料を使って磁心を試作してもらい、銅・マンガン系フェライトでこれに適する材料(R3材)を見つけた。記憶用磁心はこれを全数検査する必要があるが、このための測定機も同時に開発する必要があった。

次の問題はアドレス選択法であった。2周波法では記憶用磁心が2次元マトリックスに並ぶ(普通のコア・マトリックス・メモリの2D法に相当)。このため磁心のアドレス選択を行なうには多数の線の中の特定の一本にだけ周波数 $f/2$ の電流を流すようにする必要がある。これを能率よく行なうために誤りの訂正できる符号(Error Correcting Code, ECC)を利用する方法を考案した。まず、周波数 $f/2$ の電流の発生源としては周波数 f の電流で励振され、周波数 $f/2$ で発振するパラメトロンを使うこととした。したがってこの $f/2$ パラメトロンの総数 N (PC-1では $N=256$)はアドレス選択線の数に等しい。この N の中のただ1個のパラメトロンを選択的に発振させるようにすればよいわけであるが、これを励振する電力増幅器(当時は真空管)の個数 D はなるべく少なくしたい。一方パラメトロンが発振するには、ある閾値電流値 I_T がある。しかし I_T にはばらつきがあるので、発振するものについては I_{T_0} 、発振しないものには I_{T_1} の電流を与えて $I_{T_0} < I_T < I_{T_1}$ となるようにして、選択比 $R = I_{T_1}/I_{T_0}$ は安全のためなるべく大きくしたいわけである。各増幅器の出力は、位相が0か π 、周波数 f の定電流出力であるとし、各 N 個の $f/2$ 発振パラメトロンの励振には、増幅器の出力を正か負の極性で使うことにする。この条件の下で、 N と R を与えて D を最小化するという問題は、誤り訂正でき

る符号の構成法の問題に帰着することが分った。実際に PC-1 で使用したのは $N=256$ で、増幅器を $D=18$ 組使用し、選択比 $R=18/6$ (3:1) である。これは長さ 18 の 2 進符号系で、符号間のハミング距離が 12 以下でかつ 6 以上のものを使うことにより達成された。さらにこの方法によると、1 台の増幅器が故障しても、選択比が 18/6 から 17/7 に劣化するに過ぎないので、それでも誤りなく動作することが期待される。事実 PC-1 の記憶装置には 18 本の真空管が使用され、そのうちの一本を抜いても計算機は支障なく動作するという、興味深い結果となった。この誤りの訂正できる符号を利用する方法は、パラメロンに限らず、もっと一般的な回路も応用できるはずのものである。IBM の G. Constantine は、われわれとは独立に類似な回路を Load Sharing Switch という名称で開発したが、この種の回路と誤りの訂正できる符号との関係を明確に示したのは筆者らが最初であった³⁾。

4. PC-1 の製作

前項に述べた記憶装置の開発と並行して、高橋研究の相馬 (現在 理研) たちの手で、PC-1 の 1/4 模型 PC-1/4 が製作された。これによって高速桁上げ回路の論理設計の正当性が実証された。高速桁上げ回路とは、今日の IC 回路でいうと Look Ahead Carry 回路に相当する。この種の回路を最初に考えたのは米国 NBS (National Bureau of Standards) の S. Alexander で、われわれはこの種の回路を多数決論理素子で実現する定石を考えたのである。

PC-1 は、命令語は 18 bit の単語、数値は短語 18 bit、長語 36 bit の固定小数点 2 進計算機で、命令系は英国 Cambridge 大学の EDSAC-I に近いものであった。ただし、累算器の帰零を store 命令の変種で行なう代りに Load 命令をつけ、また入出力命令には Busy 検出機能を付加し、累算器の零検出命令も追加した。

PC-1 の論理設計は、3 変数論理関数の実現法の表と高速桁上げ回路、入力ゲート回路などの定石を組合わせて行なった。パラメロン回路の論理設計を行なっているうちに次の二点に気付いた。その一つは、定数の取扱いである。パラメロンで“0”と“1”は位相の正逆によって与えられるので、本来両者は全く対等であって、“0”と“1”の区別は、その位相を“0”と約束する定数パラメロンを一組与えることによって始めて確定する。したがって、パラメロン論理回路

には、一般にはこの定数を入力として与えなくては論理演算が実行できない。そこでこの定数入力も一つの入力とみなすことにすると、そのようなパラメロン回路で実現可能な論理関数は自己双対型のものになる。

このようにしてパラメロン回路を自己双対型の論理関数に直して分類してみると回路の型の数が減少して、関数表の見出し項目が少なくてすむ。このことはパラメロンに限らず閾値素子すべてについて同様なことが言える⁴⁾。この自己双対型による論理関数の類別法は、その後閾値論理関数の研究などに利用されるようになった。

次に気付いたのは、出力分岐数 (Fan-Out) の問題である。PC-1 では 1 個のパラメロンからの出力分岐数を 12 以下に制限した。論理設計は最初にはこの制限を無視して行なう。その結果いくつかのパラメロンについてはこの制限を超える出力分岐数のものが生ずる。これを制限以内にする過程を修正設計と呼ぶが、その方法は制限以上のものがあれば、同一機能のパラメロンを複製していわば“水増しして”並列に置くものである。ところがこの修正設計の第 1 段階の結果として、今度は別のものの出力分岐数が制限を超えるので、第 2 段階としてそれも“水増しする”…という過程を反覆する。PC-1 の場合には、この過程は経験上すぐに収束した。この方法は増幅用の中間素子を挿入する方法とは違って、余分の時間後れが増加する恐れがないという点に長所があり、パラメロンに限らず IC を始め任意の論理素子の出力分岐数制限の問題にも適用できると考えられるので、その後この“水増し”修正設計法が収束する十分条件を求めた⁵⁾。結果は極めて簡単で、出力分岐数 F が入力数 I (Fan-In 数) よりも大きければ、この過程は必ず収束することが証明できた⁵⁾。PC-1 の場合には $F=12$ で $I=5$ (5 入力多数決まで許す) なので収束するのは当然であったことが後になって分ったわけである。

このようにして高橋先生以下当時の高橋研究室のいわば総力を結集して製作した PC-1 が動き始めたのは 1958 年 3 月のことであった。

PC-1 の写真はないと思っていたが、当時の関係者の方々に問合わせたと、和田英一君が所持しているものがあった (次頁参照)。写真の左下部分がパラメロンで、両面合計 4,300 個のパラメロンが PC-1 に使われていたが、この面には 1,300 個のパラメロンがついていたと思われる。



写真 東京大学に初めて作られたパラメトロン計算機 PC-1 の部分写真

写真右端の部分が 18 bit×512 語 (36 bit×256 語) の二周波磁心記憶装置であり、上部は定数電流回路とネオン管表示部の裏面である。PC-1 の配線はほとんどすべて半田付けでラッピングは一切使用せず、コネクタも非常に少ない。半田付けは非常に慎重に行ない、錫メッキ銅線を穴あき端子に一回半巻きつけて、ペンチで押し、半田がなくても作動すること、半田は薄く流して、銅線の巻きつけ工合が見えること、をモットーとして、念入りに行なった。このため PC-1 には半田付け障害はほとんど発生しなかった。

5. PC-1 による科学計算

PC-1 は記憶容量が 512 短語 (命令語) 256 長語しかなく、入出力装置には 6 単位符号の紙テープを使う印刷電信機器しかなかった。演算時間はロード、加減算が 0.4 msec, 2 進 36 桁の乗算が 4.4 msec, 除算は 16.1 msec であった。今日のミニコンと比較して、記憶容量で 1/10, 演算速度で 1/100 にしか相当しない。しかし当時 PC-1 は東大理学部で利用できる唯一の計算機で、日本の他の大学にも使用可能な電子計算機はまだほとんどなかったため、多種多様の科学計算に使用された。入力用のプログラムとしては、和田の作成したイニシアル・オーダが広く使われた。これは Cambridge 大学の EDSAC-1 のイニシアル・オーダを参考にして作成したものであるが、命令語数を少なくするため、ありとあらゆる技巧をこらした、パズル

の解のような見事な作品であった。

今日でいう計算機科学に分類されるプログラミング手法の研究としては、高橋先生の割込み処理プログラム、高速フーリエ変換 (FFT に近いもの) プログラム、加法定理による楕円関数ルーチン、素数 P 進体 (modular Arithmetic) による任意精度の厳密整数計算法⁶⁾ などがある。筆者自身が PC-1 で最初に行なった計算の一つは、パラメトロンの動作特性を表わす非線型微分方程式の数値積分であったかと思う。

PC-1 は理学部内で物理学、地球物理学、化学、結晶学などの計算に使われた。しかし物理と地球物理に関する当時の利用者の多くが海外にあったりする関係もあり、どのような計算が当時行なわれたかを示す資料はどうも思うように集らなかったが、化学と結晶学については、総合報告と PC-1 を計算に使った論文に関する資料を当時の利用者からすぐにお知らせいただけだったので、これを参考資料として添付しておく。

また 1959 年夏に開催された日本物理学会主催の“電子計算機”に関する講習会では、プログラミングの実習を PC-1 で行なった。この種の講習会としては、わが国では初めてに近いものであったと思われるが、今日の電算機の性能と比較してみると、サブミニコンピュータ PC-1 でよく実習がこなせたものだと思うにはいられない。

おわりにあたって、パラメトロンにつき御指導いただいた高橋先生を始め、PC-1 の製作と運転に協力い

ただいた方々にここであらためて御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 高橋秀俊: “電子計算機の誕生”, 中央公論社 (1970).
- 2) 高橋秀俊編: “パラメトロン計算機”, 岩波 (1968).
以下3)-5) は2) に記載のない筆者の報告.
- 3) H. Takahasi, E. Goto: “Application of Error Correcting Codes to Multiway Switching” UNESCO International Conference on Information Processing in, Paris (1959).
- 4) H. Takahashi, E. Goto: “Some Theorems Useful for Enumerating Boolean Functions”, Proceedings of IEIP Congress 1962, North-Holland (1963).
- 5) E. Goto: “A Note on Logical Gain”, IEEE Transaction on Electronic Computers” EC-13 (1964).
- 6) 高橋秀俊, 石橋善弘: 電子計算機による exact な計算の新方法, 情報処理 Vol. 1, No. 2, pp. 78~86 (1960).

参考資料

PC-1 で行なわれた科学計算 (分野別)

○ 物理学

- H. Noya, A. Arima, H. Horie: “Nuclear Moments and Configuration mixing” Progress of Theoretical Physics, Supplement Vol. 8 (1958).
- M. Shimizu: “Two Coulomb Centre Potential Approximation” J. Phys. Soc. Japan Vol. 18, p. 811 (1968).
- Y. Hara and H. Miyazawa: “Dispersion Relations in Nucleon-Nucleon Scattering” progress of Theoretical Physics. 23 (1960) 942.

この他, 常微分方程式, あるいは磁石などの設計のため偏微分方程式を解くのに多く使われたように思うが資料は得られなかった。

○ 結晶解析

- 飯高洋一, 桜井敏雄: “電子計算機 (とくにパラメトロン計算機 PC-1) について” 鉱物学雑誌 Vol. 4, p. 198 (1959).
- 飯高洋一, 桜井敏雄: “パラメトロン計算機 PC-1 による結晶解析の諸計算について”

鉱物学雑誌 Vol. 4, p. 409 (1960).

Y. Iidaka: “The Crystal Structure of β Glycine” Nature Vol. 183, p. 390 (1959).

Y. Iidaka: “The Crystal Structure of γ Glycine” Acta Crystallographica Vol. 14, p. 1 (1961).

日本結晶学会編: “結晶解析ユニバーサル プログラムシステム” 第1巻 昭和41年発行に PC-1 で行なわれた結晶解析に関する計算の展望が記載されている。

○ 化学とくに電子線回折への応用の総合報告

飯島考夫, 森野米三: “パラメトロン計算機はどのように使われるか” 化学の領域 14 p. 521 (1966).

森野米三, 朽津耕三, 飯島考夫, 村田好正: “デジタル電子計算機による気体電子線回折計算” 日本化学雑誌 83 p. 803 (1962).

村田好正, 伊藤徹三, 朽津耕三: “電子計算機による気体電子線回折のデータ解析” 物性 5 p. 91 (1964).

○ 化学とくに分子の基準振動と分子内ポテンシャルの計算

島内武彦: “生物体の中の演算回路と記憶素子”, 科学 30 p. 39 (1960).

島内武彦: “行列の固有値” および “行列計算の自動プログラミング” 第1回プログラミング・シンポジウム報告集 (1960).

T. Shimanouchi, M. Tasumi: “Normal Coordinate Treatment and Assignment of Infrared Absorption Bands of Polyvinyl Chloride” Bull. Chem. Soc. Japan 34 p. 359 (1961).

M. Tsuboi: “ ^{15}N Isotope Effects on the Vibrational Frequencies of Aniline and Assignment of the Frequency of its NH_2 Group” Spectrochim. Acta 16 p. 505 (1960).

I. Suzuki: “Infrared Spectra and Normal Vibrations of Formamids: HCONH_2 , HCOND_2 , DCONH_2 and DCOND_2 ” Bull. Chem. Soc. Japan 33 p. 1359 (1960).

A. Yamaguchi, I. Ichishima, T. Shimanouchi, S. Mizushima: “Far Infrared Spectrum of Hydrazine” J. Chem. Phys. 31 p. 843 (1959) and in Spectrochim. Acta 16 p. 1471 (1960).

(昭和49年11月12日受付)