

二つのパラメトロン —フォン・ノイマンと後藤英一の特許をめぐって—

小山 俊士

序 二つの特許

この論文で扱う「パラメトロン」とは、1954 年に後藤英一が考案した素子であり¹、日本では真空管に代わる素子として実用化され、パラメトロン・コンピュータが開発されたことはよく知られている。後藤自身も東京大学理学部でコンピュータの製作の中心となったが、それは PC-1² と命名され、1958 年 3 月に稼働した。パラメトロンを本格的に利用したのは日本だけであり、日本のコンピュータ開発においては、第一世代の真空管コンピュータはほとんど作られず、第二世代のトランジスタ・コンピュータとパラメトロン・コンピュータが並行して開発されたという、他国とは異なる歴史があったとされる。ところが、パラメトロンの原理を用いたコンピュータの素子については、フォン・ノイマンも後藤よりも 1 ヶ月早く、アメリカに特許を出願していた³。まったく独立の考案だが、大幅に重なる内容を持つ特許だった。この論文は 2 つの発明を比較、分析し、その歴史的な文脈を考察することを目的としている。

2 つの発明の背景には、1950 年代前半における真空管に代わりうる素子の探究があった。当時のコンピュータの記憶・論理素子としては真空管が使われていたが、真空管は電力消費量が大きく、小型化や低価格化が困難であり、故障しやすいという欠点を持っていた。フォン・ノイマンもプログラム内蔵型コンピュータ EDVAC の報告⁴の中で、真空管の問題点に注目し、ENIAC では累算器を作るために多数の真空管を使っていたが、EDVAC は水銀遅延線などのメモリを使用し、真空管の本数を減らせることの利点を強調した。真空管は、コンピュータの性能向上に対する大きな制約だったのである。1947 年に点接触型トランジスタが発明されたことで、半導体はその代替として有力な候補と

なっていた。しかし、半導体は製造と品質管理が困難だったため、技術上の難点が克服されて、トランジスタを用いたコンピュータの開発が本格的に始まるのは、1950年代後半以後であった。当時は他の物理現象を応用する可能性も探究されており、ここで扱う2つの特許は共振回路で生じる「パラメーター励振現象」を応用し、記憶と論理演算を実現する方法を考案したものだった。マムフォード⁵によると、1920-30年代から電気回路の「パラメーター励振」に関心が高まっていた。そして、「1954年に、フォン・ノイマンと後藤が独立に、副共鳴振動の位相に多値性があり、この多値性を論理回路として利用できると認識」したことで、可変インダクタンスを持つコイルを使ってパラメトロンが開発された。1952年にはエドワーズが可変静電容量を持つ、すなわちパラメーター励振を生じさせるシリコン・ダイオードを作りうることを明らかにしていたし、1957年にズールがマイクロ波での可変リアクタンスがフェライト素材によって得られることを発見し、ここから「パラメーター増幅器」が作られていった。パラメーター励振に対する関心は、競合する真空管や半導体の技術の発展とともに、「シーソーのように上下を繰り返して来た」が、パラメトロンの開発もその1コマだととらえられるとする。ここではパラメーター励振の利用を試みた歴史の中で後藤とフォン・ノイマンの見出したアイデアを分析していく。

2人の提案したアイデアは共通のものだったが、その後の開発の過程は全く異なる経過をたどった。日本では酸化物磁性体のフェライトを用いてパラメトロンを開発し、それを用いたコンピュータが数十台製造された。その一方で、フォン・ノイマンが1957年2月8日に亡くなったこともあるのか、アメリカで特許の実用化へ向けた取り組みはなく、可能性を提示したのにとどまった。第6章で詳しく見るが、フォン・ノイマンは磁性体を用いる素子は真空管に比べても低速であるため興味を持たず、将来半導体を用いて新しい高速の素子を作る可能性に意義を見出していた。その違いは、1950年代のコンピュータをめぐる日米の状況を反映している。既に多数の真空管式コンピュータが稼働していたアメリカではより優れた素子を探究していたのに対して、まだ1台の真

空管式コンピュータも持っていなかった日本では、手近な材料で実用化可能な方法を求めていたといえる。以上のように、2つの特許の分析を通じて、1950年代のコンピュータをめぐる状況を考察していく。

1. パラメトロンの開発とフォン・ノイマン特許

1.1 プログラム内蔵型コンピュータの開発

1946年に真空管式の計算機 ENIAC が完成した後、各地で真空管式のプログラム内蔵型のコンピュータの開発が始まった。フォン・ノイマンは ENIAC の開発に参加した後、プリンストン高等研究所でコンピュータの開発を進め、それは 1952 年に稼働した。その頃、同じ方式のコンピュータがイリノイ大学等でも製作されていたし、その他にもアメリカでは多くのコンピュータが動き始めていた。コンピュータの製作と並行して、欠点の多い真空管に代わる素子の探究も行われており、フォン・ノイマンは其中で当時の一般的な真空管の 1000 倍の速度を持つ素子のアイデアとしてこの特許を出願し、顧問契約を結んだ IBM に譲渡された⁶。

それに対して日本では、アメリカやイギリスからの情報に関心を持った研究者は少なくなかったが、1954年の時点でまだ真空管コンピュータは完成していなかった⁷。当時の日本の経済状況では、高価な真空管を大量に用いて本格的なコンピュータを開発することは困難だった。富士写真フイルムで日本最初の真空管コンピュータ FUJIC が完成したのは 1956 年だったし、東京大学工学部で文部省科学技術研究費による総合研究班「電子計算機の研究」も始まっていたが、真空管コンピュータ TAC が完成したのは 1959 年だった。

1954年には、後藤は東京大学理学部物理学教室の高橋秀俊研究室に所属する大学院生であったが、高橋は、性能は低くても仕方がないので、とにかく動くコンピュータを作りたいと考えていた。その際、高価な真空管を大量に使う予算はなかったので、コンデンサの電圧で数を記憶させ、電話交換機の回転スイッチを利用した電子機械式計算機を作ることを意図していた⁸。後藤は、高

橋研究室でコイルやコンデンサを使った回路を研究しており、その過程で「パラメトロン」の考案に至ったのだった⁹。

1.2 パラメトロン開発者によるフォン・ノイマンの特許の認識

後藤が最初の特許を出願した後、パラメトロンの開発が始まったが、その過程でも種々の工夫が必要とされ、また様々な可能性が追究されて、多数の関連特許も生まれた¹⁰。基本特許はアメリカにも「Resonator Circuit」¹¹として出願され、イギリス、フランス、西ドイツにも出された。そのとき、日本にはフォン・ノイマンの特許のことを知っている者はいなかったが、パラメトロンの開発が進んでいく過程で、その存在が認識されることになった。

高橋の回想¹²によると、フォン・ノイマンの特許の存在を知ったのは、パラメトロンの特許を西ドイツに出願した際に、審査官から指摘されたためだった。また、アメリカに出願した際には、特許審査官が「It does not operate.」とかって却下してきたのである。結局特許は通ったが、その間アメリカ側はフォン・ノイマンの特許について一言もいってこなかった」とも書いている。アメリカの特許審査官も見落としていたように、フォン・ノイマンの特許は1955年の時点ではまったくといっていいほど注目されていなかった。2つの特許の原理は共通であったが、この後見ていくように、フォン・ノイマンの特許には具体的な実現方法が示されていないこともあり、後藤の特許は海外でも成立した。

1.3 パラメトロン関連特許でのフォン・ノイマンの特許の引用

日本でパラメトロンの開発が本格化し、海外に向けても特許が申請され、論文などによって情報が発信されるようになると、IBMなどのアメリカのメーカーもパラメトロンの関連特許を申請した。IBMが日本で出願したウィリアム・ロウチリン・マクミランの発明による「スイッチ回路」¹³(1960年5月28日出願)は、「データ処理装置において使用しうる論理回路にいられる多相安定装置の

一形式の具体的な例はジエイ・フォン・ノイマン氏の米国特許第 2815488 号明細書に示され且更に 1959 年 4 月発行のアイ・アール・イー誌第 47 号第 516 ～ 523 頁に、アール・エル・ビーギントン氏によって掲載された計算における新概念と題する論文中に記述されている」というように、フォン・ノイマンの特許を実現するものとしている。また、「ビーギントン氏」の論文¹⁴は、フォン・ノイマン特許の素子と回路について紹介したものだ。この論文が書かれた背景には、その前年にフォン・ノイマンの特許が成立し、日本でのパラメトロン開発の情報が伝わり、そしてパラメーター増幅器なども盛んに論じられるようになったことがあると考えられる。もしアメリカでもパラメトロンが実用化されていたら特許権の争いが生じた可能性もあったが、その頃には半導体を使ったトランジスタが普及しており、そういうことにはならなかった。

2. 特許の構成

2.1 フォン・ノイマンの特許

フォン・ノイマンの特許は、本文および請求が 13 ページで、17 枚の図のために 7 ページが使われ全体で 20 ページから成る特許としては長大な文書であり、発明の基本原則から実用上生じると考えられる難点と解決法までを含む包括的なものである。フォン・ノイマンの特許の本文には (0.1) といったような番号を付けているので、それを用いて特許の構成の概略を示すと、(0.1)–(0.8) は全体を要約する総論、(1.*) は発明した素子の基本原則、(2.*) は 2 個および多数の素子の接続法、(3.*) は論理演算を実現する方法、(4.*) で実用上で問題となりうることの補足となり、最後に、特許の請求事項 1 から 10 ままでが列挙されている。細かく内容を区切って、新素子の必要性、基本原則からその応用、補足的な注意というように、整然とした構成である。

なお、番号の付け方には不備があり、例えば、(1.1) と (1.2) の後、議論が詳細になるからか桁が増えて、(1.3.1) と (1.3.3) となる。(1.3.1) の次が (1.3.3) となり (1.3.2) が欠番であるが、後の (4.2.1) でこの番号を参照して、「結晶ダイオー

ドにおいて、結晶の“前進バイアス”は、その結晶の瞬間の温度や物理的条件によって適切に調整されることを意味する」と述べているので、ここに注意を加える予定だったと考えられる。(1.4.1)の次が(1.4.4)で、その次が(1.5.5)と番号が飛んでいたりするのだが、ここは一連の議論になっているので、番号の打ち間違いであろう。またこの特許は、半ば学術論文ともいえる書き方になっていて、番号の不統一は、フォン・ノイマンがより長い論文を準備していて、その一部を抜粋して特許にしたためかといった想像もできる。

2.2 後藤英一の特許

後藤の特許「補助変数励振共振子」は本文が4ページで、図が2ページであり、「補助変数励振共振子による論理演算」は本文が4ページで、図が3ページと、フォン・ノイマンの特許と比べるとコンパクトにアイデアをまとめたものになっている。

「補助変数励振共振子」は、冒頭で真空管の欠点を指摘し、それに代わるものがこの発明だとしている。次に結線図をもとに発明の実施例を示している。その後、共振回路の微分方程式からこの発明の原理を説明し、最後に実際に回路を作って実験が上手くいったことを報告する。「補助変数励振共振子による論理演算回路」は、2個以上のパラメトロンを結合し、情報を伝達していく仕組みを述べる。そして多数のパラメトロンの結合によって、論理回路が構成できることを示す。

原理から実用化までを包括的に描いている点はフォン・ノイマンの特許と共通であり、従来のものとはまったく異なる新しい素子の考案であることを強く意識していたのであろう。一方で、後藤の特許は結線図の例を示し、その動作を通じて原理の説明を行っている点は、抽象的に議論を進めるフォン・ノイマンの特許との大きな違いであり、特許出願と並行して、試作を始めていた状況を反映しているといえる。

表 フォン・ノイマンの特許の構成と後藤の特許の対応する内容
 後藤の特許については、『補助変数励振共振子』を S32-7103, 『補助変数励振共振子による論理回路』を S32-5953 と略記する。

フォン・ノイマンの特許	後藤の特許
(0.1) – (0.8) 総論	S32-7103 と S32-5953 の冒頭
(1.*) 素子の基本原理	
(1.1) – (1.2) 素子の基本的特性	S32-7103 の p.1–2 共振回路, p.2–4 補助変数励振共振子の理論式
(1.3.1), (1.3.3) 結晶ダイオードの共鳴周波数	S32-7103 の p.1 フェライト磁心を用いた共振回路と励振電流
(1.4.1), (1.4.4) 発振	S32-7103 の p.1 1/2 分周波の発振
(1.5.5), (1.5.6) 出力信号の位相	S32-7103 の p.2–4 理論式による 2 つの位相の説明
(1.6.1) – (1.6.4) 出力信号の位相の制御	S32-7103 の p.1–2 位相制御用発振器と発振状態の継続
(1.7.1), (1.7.2) 素子の特徴のまとめ	
(2.*) 2 個および多数の素子の接続	
(2.1.1) – (2.1.5) 2 個の素子の接続	S32-5953 の p.1–2 2 個のパラメトロンの接続と情報の伝達
(2.2.1) – (2.2.7) 多数の素子の接続	S32-5953 の p.2 パラメトロンの遅延回路の例
(3.*) 論理演算を実現する方法	S32-5953 の p.2–3 論理積回路の原理, 構成方法
(3.1.1) – (3.1.5) 位相差による論理演算	
(3.2.1) – (3.2.5) 結晶ダイオードによる論理回路	
(3.3) (a) – (f) 論理演算を実現する方法	

(4.*) 補足 (4.1.1) – (4.1.5) 共鳴現象で位相差を制御する方法 (4.2.1) – (4.2.3) 振幅や位相を調整する方法	(これに直接対応する項目はない)
---	------------------

3. 発明した素子の特徴

3.1 真空管に代わる素子の必要性

ここから、2 人の特許の内容を詳しく検討していこう。最初に真空管の限界を指摘して、発明の意義を示す点は共通である。フォン・ノイマンの特許では、この時代の論理機械の制御や処理に使われていた「真空管は本質的に過敏で、寿命が限られた装置」(0.2) という欠点を持つので、これを置き換える装置が求められるということから始まる。後藤の特許でもこの認識は同じで、パラメトロンは真空管と継電器（リレー）に代わる素子だとする。

その一方で、半導体の評価は全く異なる。フォン・ノイマンの特許では、真空管に代わる素子の満たすべき特徴として「より高速で、小さく、発熱が少なく、性質が安定していて、信頼性が高く、長寿命」(0.3) という項目を列挙し、半導体の実用化が進むとことを前提に、トランジスタとは異なる原理で「結晶ダイオード」という半導体素子を作することを提案している。後藤は「電力の比較的少ないトランジスタが発明せられたが、高価な上に未だその性能、安定度等に未知の点が多く」、真空管の代替となるかは未知であるとして、磁性体素子を提案するのである。この違いについては、第 5 章で詳しく検討する。

3.2 素子の基本原理

コンピュータの素子に求められる最も基本的な機能は記憶であり、真空管では数本を組み合わせたフリップ・フロップ回路で実現した。それに対して、後

藤とフォン・ノイマンの特許は電気回路の共鳴現象を利用して、発振波の2種類の位相のどちらかを記憶する素子を提案するのである。

フォン・ノイマンは発明した素子の基本原理を(0.4)で簡潔に要約し、(1.1)と(1.2)で補足を加えているが、この発明の基本素子は「静電容量とインダクタンスを持つ電磁装置」であり、「静電容量とインダクタンスの少なくとも一方は非線型」となる装置であり、非線型性として持つべき特徴を「静止状態付近の小さな励起に対して、近似的に線型に振る舞う」、「この静止状態すなわち平衡状態の近傍で近似的に調和振動として振る舞う」と説明を加えている。そして、装置には「発振させるために、振幅を変化させた交流電力が供給」され、生ずる共鳴周波数を出力とする。

フォン・ノイマンは原理となる現象を、調和振動、共鳴と簡単にするだけだが、後藤はそれを表す微分方程式を示し、近似解についての数学的な考察も加えて、より詳しく論じている。まずこの現象が起こる回路については、「本発明共振子は以上説明のような性能を有するものであるが、これは補助変数励振（パラメーター励振）現象の理論式を用いて説明し得るものである」と参照すべき理論を示した。特許では、『岩波数学辞典』¹⁵を参照してこれがヒル方程式、ないしはマシュー方程式と呼ばれることを紹介している。その後刊行した論文では、参考文献としてマクラクラン¹⁶の著書を挙げているが、これは非線型常微分方程式の解の振る舞いについて、実験と結びつける研究を行ったもので、電気回路での発振の例も与えられている。そして、この特許で利用するパラメーター励振現象（補助変数励振現象）とは「このLとCの一方又は双方の値を時間 t の函数として適当に変化せしめることによって、共振回路に発生した特定の振動を時間と共に増大せしめんとするものである」¹⁷と定義される。パラメーター励振現象の数学的な研究は、パラメトロンの開発過程でも続けられた。当時の応用数学において、比較的新しいテーマであったため、後藤の特許では文献を参照しつつ詳しく説明している。フォン・ノイマンの特許では具体的な説明をしていないが、当たり前のことと考えていたのだ

ろうか。

利用できる発振周波数は1つだけではないが、フォン・ノイマンも後藤も、その中の電力供給の周波数の1/2の発振周波数（1/2分周波）にのみ注目して、詳細な検討を加えていく点は共通である。フォン・ノイマンはまず複数の分周波があることを述べ、(1.3.1)以後は、2つの場合に限定して議論を進めていくが、ときどき一般化の可能性にも注意する。数学の論文に近い書き方で、できるだけ一般的な考察を行った後、応用の段階に至って、1/2分周波に議論を限定していくものだった。それに対して、後藤の特許は、最初から1/2分周波の実現性に重点を置いた書き方だった。

3.3 2つの位相とその制御

パラメーター励振現象がとりうる複数の位相を記憶に使うことは、これ以前から考えられていた。例えば、後藤は米国へ特許を提案する際に参照特許を挙げているのだが、その中のイズボーンが1950年に申請した特許「二つの安定した平衡状態を持つ回路」は、「コンデンサと磁心コアを用いた回路に二つの共鳴条件を与え、その状態を変化させることができる」という考案であった¹⁸。こういった先行する発明に対して、励振の位相を決めるには、電力供給によって共鳴（発振）させるときに、制御用の信号を与えればよく、その制御信号は同様の素子の発振でよいということこそが、フォン・ノイマンと後藤による最も重要なアイデアであった¹⁹。これによって、素子の間で情報を伝達し、様々な処理を行わせることができるようになるのである。

フォン・ノイマンの特許の(1.4.1)と(1.4.4)には、言葉の定義が与えられている。素子には外部の電源から周波数 f_i の電流が与えられるが、それは電力供給 P_i と呼ばれ、素子は共鳴により周波数 f_o を発するが、それは信号 S_i と呼ばれるというように、関心の対象は入力と出力である。後藤の特許では、電力供給を励振電流、信号を発振電流と呼んでいる。2つの特許は、素子の出力する信号が複数の位相をとることを利用するもので、制御信号によって、位相を

2つのうちのどちらかに決める方法は、まったく同じである。

フォン・ノイマンの特許の (1.7.1) と (1.7.2) では、共鳴と制御信号のタイミングについて、より具体的に説明している。電力供給 P_s が低い電圧から増加してある値を超えると共鳴が起こるのだが、そのときに素子に加えられている制御信号によって出力信号の位相が決まる。つまり、信号の届く時刻によって、制御が行われるのである。そして、素子の持つ特徴として、制御信号に比べてかなり大きな出力信号を生み出しうる増幅特性、制御信号の時間的長さによらない出力信号の持続性、出力信号の位相を2つだけに決める量子化、制御信号に対する出力信号の記憶があることを列挙している。これを組み合わせれば、「(真空管の) 機能のすべてを実現できる新しい優れた器官を作る」(0.4) ことができるとする。後藤の特許「補助変数励振共振子」でもこの原理はまったく同じである。

4. 素子の結合と論理回路

4.1 2個の素子の非対称な結合

1個の素子では、位相を記憶することしかできない。多数の素子を結合し、情報を伝達する過程で論理演算を実現することによって、コンピュータは様々な処理をできるようになる。位相によって情報を記憶する素子では、論理回路を実現する方法も真空管とは異なったものにならざるをえない。そのため2人の特許は、複数の素子を接続して、位相の情報を伝達し、それを利用して論理回路を構成する方法について、詳しく説明していく。フォン・ノイマンの特許ではまず、(2.1.1) から (2.1.3) で2個の素子の結合法を述べるのだが、一方の出力信号が他方の素子の制御信号になるように「命令 — 実行関係を組織する」。この関係を実現する方法は、2個の素子に与える電力供給の変化に時間差を設けて、一方が出力信号を発しているときに他方が共鳴を始めるように調整するのである。

後藤は特許「補助変数励振共振子による論理演算」において、2個以上のパ

ラメトロンを結合させ、順次励振を伝達していくのだが、伝達の方角を励振の順序によって決めるとしており、この方法も同じだった。

4.2 3 個以上の素子の結合

次に、複数の素子を結合して、論理回路を構成する。フォン・ノイマンの特許では、(2.2.1)–(2.2.7)で多数の素子の結合について説明している。多数の素子を接続して回路を構成する際には、命令—実行関係を決めること

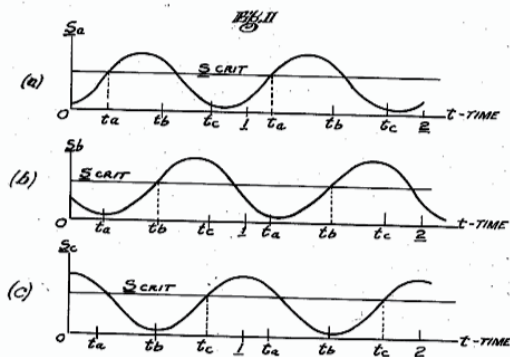


図1 3種類に分類された素子への電力供給の時間変動 フォン・ノイマン特許の Fig. 11 より

が重要で、そのために図1のように電力供給の振幅の時間変動（振幅変調）の違いによって、装置内の素子を3種類 (a), (b), (c) に分類する。こうすると、(a) が出力信号を発しているときに (b) が共鳴を始めるので、(a) は (b) を制御できる。同様の方法で (b) が (c) を制御でき、(c) が (a) を制御できるというように、「完全に循環対称性を持つ」方式で制御する。

このように使用する素子を3種類に分類して、共鳴のタイミングを変えることも重要な工夫であるのだが、後藤の特許でもこのアイデアはまったく同じで、パラメトロン素子を組I、組II、組IIIの3種類に分類している。後のパラメトロンの開発の過程では、「3拍励振回路」と呼ばれるようになった。

4.3 多数決による制御

論理回路を実現するためには、とりうる2つの位相の一方を0, 他方を1と定義し, 命令-実行関係において, 命令となる側の複数の素子の出力の0と1の多数決によって, 実行する側の素子の位相が決まるようにする. フォン・ノイマンの特許の(3.1.2)では, 入力信号の振幅がみな同じだとすれば, 位相の異なる2つの波はちょうど逆符号になって打ち消され, 数の多い波だけが残るので, 制御を受ける素子は, 「多数決器官 (majority organ)」になるとする. この多数決器官を応用して論理回路を構成していくのだが, その前に(3.1.3)から(3.1.5)で註釈を加えている. それは, 常に多数派ができるよう奇数個の素子を結合することと, 常に同じ位相を出力する「恒久的波源 (permanent source)」を用意しておくこと等である.

フォン・ノイマンの特許の(3.2.1)–(3.2.5)では, 簡略に図式化する方法を説明している. 図2のように, 電力供給は省略し, 3種類の共鳴のタイミングの何れに属するかを示

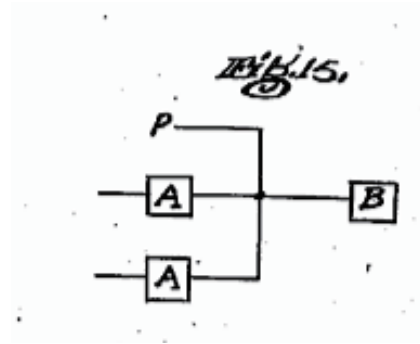


図2 論理和の回路 フォン・ノイマン特許の Fig.15 より

第3図

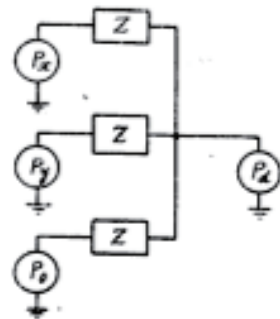


図3 論理和の回路 後藤特許「補助変数励振共振子による論理演算回路」の第3図より

す A, B, C と, 複数の素子の接続だけを示すのである. ここで p は恒久的波源を示している.

後藤の特許でも多数決を使う点は同じで, 論理和の図式が図 3 のように与えられている. この回路では, 「 P_x, P_y は夫々振動の位相」のパラメトロンで, 「 P_0 は常に 0 を記憶しているパラメトロン」であるというように, よく似た図式になっている. なお, この特許の中では結合素子 Z (インピーダンス) についての詳しい説明はないが, その後, 素子間の適切な結合条件についての研究も行われていく.

4.4 基本的論理演算

以上の準備に続いて, 論理回路の構成を与え, それによってコンピュータの素子となりうることを示される. フォン・ノイマンの特許では (3.3) において, 基本的論理演算を素子の集合体によって実現する方法を解説する. 入力を与える 2 つの素子と, 正または負の恒久的波源を 1 つの多数決器官に接続することで, 「または」と「かつ」を実現する. 次に, 「または」の入力の一方を遅延によって否定することで, 「ならば」を実現する. そして, 二進数の加算における和と繰り上がる数を決める演算も実現できるとするのである. この論理回路を実現する方法については, 後藤の特許の説明もまったく同じ方法を示している.

ここまでの内容については, フォン・ノイマンと後藤の特許はほぼ同一のアイデアを提示したものであった. 素子の間の結合の仕方まで共通のアイデアがほぼ同じ時期に独立に登場した点は驚くべきことあるが, 複数の素子を接続し, 時間差を用いて位相情報を伝えるという原理を発見すれば, 後は必然的な方式であったといえるのかもしれない.

4.5 実用化の際に生じる問題

後藤の特許の内容はここまでだが, フォン・ノイマンの特許はさらに, 実際

にこれを使用したときに生じると予想される問題と対策を挙げる。フォン・ノイマンは理論的に考察しただけで、実際に装置を製作したわけではなく、また電子工学の専門家ではなかったにも関わらず、かなり細かな問題も取り上げて検討しているのだ。

やや戻るが(2.1.4)で、多数の素子を接続するとき、すなわち、 $O_3 \rightarrow O_1 \rightarrow O_2$ という順番で制御するように接続されているとき、 O_3 の出力が O_1 を通して O_2 へも伝播することで、「 O_2 に対する追加的な—望ましくない—制御が生じないのはなぜだろうか？」としている。これは、この素子の入力と出力が共通であることから生じる問題である。解決策は、 O_1 を介した O_3 から O_2 への信号を「適量だけ弱めることがすべてである」としている。

これはパラメトロンの実用化の過程で実際に考慮された、「飛び越し結合」と「逆結合」の問題に相当すると思われる。「飛び越し結合」とは、装置内のパラメトロンをI, II, IIIと分類し、 $\rightarrow I \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow I \rightarrow$ という順番で発振波を伝えて位相を制御するように結合するとき、IIの素子は左側のIの素子の出力によって制御されるべきだが、右側のIの素子の出力もIIIを飛び越してIIに影響を与えてしまう問題だ。後藤は1955年3月12日出願の特許「補助変数励振共振装置」²⁰で、逆方向の電圧をかけて打ち消し合わせるという解決方法を提案している。もう一つの「逆結合」は、 $I \rightarrow II$ の順番で制御したいのだが、IIの素子数が多く、Iと逆位相に発振するとき、IIの出力がIに影響を与えて、途中でIの位相が反転してしまう問題である²¹。フォン・ノイマンの指摘が飛び越し結合と逆結合のいずれを対象としているのかは不明確だが、結合に方向性がないために生じる問題に注目するのは妥当なことだった。パラメトロンの開発の過程では、これらの問題の解決のために様々な考案が試されたのだが、最終的にPC-1で使用されたのは、フォン・ノイマンの提案と同じ方法で、抵抗により信号を弱めるという最もシンプルな解決法だった。

コンピュータに使うための新たな素子を実用化するには、1つのアイデアを着想するだけでは不十分で、関連する諸技術の開発も必要となる。フォン・ノイマンは重要な問題点のいくつかに気づいていたものの、それを解決して開発

を進める準備はしていなかったようである。一方、実際に開発されたパラメトロンでは、後藤自身は1954年5月28日から1956年6月21日までに関連の特許を23件出願²²し、その他にも共同研究を行った電電公社や国際電電株式会社、その他のメーカーの技術者らによって様々な工夫が加えられたのだった。

5. 相違点

5.1 実現への展望

ここまではフォン・ノイマンの特許の順番に沿って2つの特許を分析してきたが、全体に共通した内容が多かった。それに対して、本章では顕著な違いが見られる箇所を抽出しながら、両者にどのような違いがあったのかを考察していく。

2つの特許の目的である、真空管に変わるコンピュータの素子を探究することは共通なのだが、その候補の1つであった半導体に対する見方は異なる。フォン・ノイマンは発明を実現する素子として「結晶ダイオード」を第一の候補と考えたが、これも半導体で作られるものである。一方で後藤は、トランジスタが実用になるかは「将来の改良にかかっている」として、このときは磁性体でパラメトロンを作ること提案している。将来の可能性を追究するのか、すぐに実用化できる技術を求めているのかの違いであり、このことから各々の特許に示された装置の具体性はまるで異なるものになった。

5.2 具体的な装置の描像

フォン・ノイマンの特許は、基本原理に対応する性質を持つ素子を抽象的に示すだけで、それ以上にアイデアをどのように実現するかについての具体的な説明を与えていない。素子の候補として、第一の例として「非線型の静電容量を持つ結晶ダイオード」(0.5)、第二の例として「飽和可能な磁気コア」(0.7)を挙げるが、その具体的な設計には触れず、「非線型のリアクタンスを持つ回路」

というように素子の持つ特徴を一般化して論じるに留めている。特許の中では図4のように模式化し、電力供給 P_s 、信号

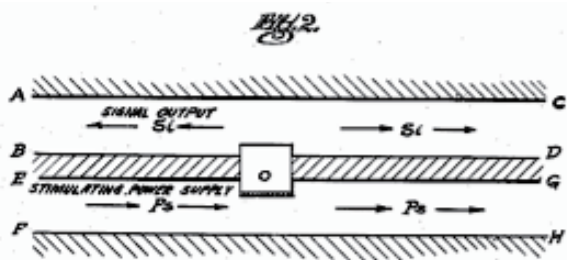
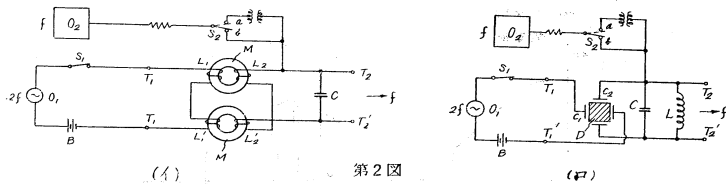


図4 素子の模式図 フォン・ノイマン特許の Fig.2 より

S_i という外部との入出力だけを表現している。細部を省略し、論理的な構造にのみ焦点を当てた説明をしており、すぐに回路を作ろうとは考えていなかった。

それに対して後藤の特許には、図5のような具体的な結線図（回路図）が付けられ、コイルやコンデンサを明記して、パラメトロンを実際にどう作ることが説明されている。試作の際に使用した部品やその動作条件についても、「磁心即非線型リアクター素子 M として厚さ 2mm、外径 14mm、内径 5.5mm、初導磁率約 600 のオキサイドコアを使用」「励振用電源 O_1 から $2f$ なる周波数の交流約 50mA を重畳した励振電流を加え、その周波数 $2f$ を約 300KC から 700KC 迄変化」というように明記している。

第1図



第2図

図5 パラメトロン素子の結線図 後藤特許「補助変数励振共振子」の第1図より

フォン・ノイマンはこの段階では抽象的な論理構成を明らかにするだけで十分であり、実用化は半導体が改良され「結晶ダイオード」が現実のものとなる将来のことであると考えていたのに対して、後藤は特許を出願したときには既にパラメトロンの試作回路を作っており、すぐに開発を始めたという状況の違いを反映している。後藤の示した回路は原理を実現する方法の一例に過ぎないことから、日本ではコンデンサの静電容量を変化させる素子²³などの様々な可能性も探究された。結局、パラメترون・コンピュータは、最初に提示した方法で開発されたが、後藤はその後モエサキダイオード、薄膜磁性体、ジョセフソン接合等を用いて、同様の原理の実現を目指した素子の研究を行った。この点では、具体的な素子の描写を略して、原理のみを考察したフォン・ノイマンの姿勢は、本質を突いていたといえるかもしれない。

5.3 速度の評価

フォン・ノイマンは「結晶ダイオード」を用いれば、真空管より高速になることを重視する。(3.2.3)では、電力供給の周波数 f_1 は「1,000–30,000Mc/秒」(Mcはメガサイクル)ののだが、演算速度を決めるのは電力供給を変化させる周期であり、その「変調周波数は f_1 より30–60倍低いものとなるだろう。すなわち、上の例で、17–1,000Mcになる」と推定している。一方、磁気コアについては、(0.7)で結晶ダイオードの1,000分の1程度として、周波数が低く遅いと評価している。このことから、「特別な高速性を示す — 通常の真空管を使った装置の、100倍から1,000倍速い。それゆえ、選ばれる電磁装置として、非線型の静電容量を持つ結晶ダイオードを選択する」(0.5)というように、速度を選択の基準にしている。

それに対して、後藤の特許「補助変数励振共振子」は、磁気コアでの実験の結果、「励振周波数8MC（発振周波数4MC）まで発振することを確認得た」と報告するが、これはフォン・ノイマンの f_1 に相当し、その推定（1Mc–30Mc）の範囲内の値である。

後藤は特許の時点ではあまり気にしていなかったようだが、パラメトロンでは演算速度が遅く、本質的な限界があることを認識し、「いまのものより、もう少し安定なトランジスタが非常に安く大量に生産されるようになれば、パラメトロンの存在価値はまったくなくなるでしょう。それまでの過渡的な運命しか持っていないのかも知れません」²⁴と留保を付けていた。それでもこの時点ではトランジスタはまだ実用化の途上にあり、真空管には対抗しようと考え、パラメトロンの開発を進めたのだった。

5.4 開発されたパラメトロン・コンピュータ

後藤の着想にもとづき、東大高橋研究室、日本電信電話公社、国際電信電話株式会社を中心とした共同研究が始まった。パラメトロン・コンピュータの開発とともに様々な種類のフェライトが試されたが、10Mc 付近まで上げると損失が急増し、実用的でなくなるという結果が得られ²⁵、磁気コアを用いた素子では速度に制約があることが確実になった。高橋研究室で作られたパラメトロン・コンピュータ PC-1 では、励振周波数は 2.2Mc だったが、そこでの実用クロック周波数（変調周波数）は 15kc で、最大 70kc まで実現できた。さらなる高性能化を追求した PC-2 でも、励振周波数 6.0Mc、クロック周波数 60kc から 200kc であって、次章に示すように、真空管に比べても低速だった²⁶。

だが、当時は真空管やトランジスタを用いたコンピュータと比べても、それほど見劣りしないものと考えられていた。高橋は、1960 年に日本で稼働していた各種の計算機として、真空管コンピュータ TAC、トランジスタ・コンピュータ ETL-Mark IV、パラメトロン・コンピュータ PC-1 等の性能を比較しているが²⁷、「現在の国産の計算機では、トランジスタ式は数百 kc のクロック周波数で直列方式、パラメトロン式は数十 kc のクロック周波数で並列方式のものが多いため、両方とも速度は大差ない」と結論した。クロック周波数で比較すると、パラメトロンは真空管やトランジスタの 10 分の 1 程度だが、PC-1 では計算方式に工夫を重ねて、同程度の計算速度を実現していたのだった。高橋は、平均

計算速度が、TAC では加減算が 0.48ms, 乗算が 5.04ms, 除算が 9.86ms であり、ETL Mark IV では加減算が 3.4ms, 乗算が 4.8ms, 除算が 6.8ms だったのに対して、PC-1 では加減算が 0.3ms, 乗算が 3ms, 除算が 12ms だという数値を示しており、確かに大きな差は見られない。もちろんこの後、トランジスタ・コンピュータの方にも様々な工夫が加えられていくのだから、クロック周波数の差が大きく影響することになる。そして、トランジスタの改良が進み、さらに高速化されていく過程に、パラメトロンはついていくことが出来なかった。だが、開発された時点では、パラメトロンの動作速度の遅さは、計算方式の工夫で補いうるものと考えられていたといつてよいだろう。

後藤は東京大学理学部物理学科、情報科学科の教授となって、コンピュータとその応用についての様々な研究を行っていくのだが、新たな計算素子の探求も重要なテーマだった。その中で、パラメーター励振の可能性を、何度も追究した。1960 年代には半導体や薄膜磁性体を使ったパラメトロンも研究した。そして 1980 年代には、ジョセフソン接合を用いたパラメトロンの研究も行い、それが半導体より発熱が少なく、高速化しうるということを原理的に示すことはできたが、実用的な生産技術を開発するには至っていない。

6. 結論

2 つの特許が日米で異なる扱いを受けた背景には、1950 年代前半における真空管コンピュータの普及の差があった。フォン・ノイマンが特許を出願した 1954 年の時点では、プリンストン高等研究所において製作されたプログラム内蔵方式の真空管コンピュータが稼働し、科学研究に使われていた。高価な真空管を大量に使用することも、軍からの資金援助があったので致命的な問題とはいえなかった。本稿で扱った特許は、そういう状況下で将来の可能性を追究するものとして提案された。「結晶ダイオード」と「磁気コア」の二つ可能性を挙げたが、磁気コアを使って、稼働中の真空管コンピュータより低速なものを作る必要はなかった。結晶ダイオードが実用化されれば、より高速の素子を

作りうるという点にこそ意義があったのだ。

それに対して日本では、関心を持った研究者は少なくなかったが、高価な真空管を大量に使えるだけの予算を持った機関は限られ、まだ真空管コンピュータは存在しなかった。後藤は当時の制約条件の下で、実現可能な方法を見つけて出すことに最大の関心を持っていた。パラメトロンは、酸化鉄とその他の金属からなる磁性体のフェライトを使って開発されたのだが、第二次世界大戦中に、無線通信のために各種のフェライトが開発され生産されたため、戦後は容易に入手できる素材となっていて、フェライトの応用の可能性も広く探究されていた。身近で安価な素材を使ってプログラム内蔵型コンピュータを作りうることに注目したのだった。1950年代後半にはトランジスタの改良が進むのだが、発明の時点では後藤らにとって、パラメトロンだけがデジタル・コンピュータを作りうる選択肢であった。

また、発明を実用化する際に求められる、関連技術の開発に対する評価も違っていたと考えられる。バイギントンはフォン・ノイマンの提案した「方式のハードウェアの実現は、今やトランジスタ時代にあるコンピュータ・システムの技術者にとって、突飛なものに見えるに違いない」と1958年に書いている²⁸。その理由は対応する部品がないことであり、既に動作しているトランジスタ向けの技術が確立していたのに、わざわざこの素子を実現するための技術開発をすることは、費用の面からありえないというものだった。そして、フォン・ノイマンの特許の意義は、極限まで速度を速めるためなら新しい方式を探究することもあり、将来の可能性を示した点だとしている。トランジスタを製造し、それを実装したコンピュータを開発するため、技術の膨大な蓄積ができた後に、それと同程度の速度であるなら、新たな素子のための技術をわざわざ開発する可能性はなかったのである。この制約については、特許が出願された時点でも考慮されたのではないだろうか。フォン・ノイマンらにとって真空管コンピュータが動いていたのだから、それよりも低速な磁気コアを使うために、わざわざ独自の部品開発をする可能性はなかったであろう。

それに対して、日本ではまだ1台の真空管コンピュータも稼働していなかつ

たのだから、そのための技術の蓄積も乏しく、後藤らにとってパラメトロン・コンピュータを実用化するための技術開発も、大きな障害とは考えられていなかった。本論文に紹介した結合法など、パラメトロンの共同研究では様々な関連技術を生み出されていったのだが、特に大変だったのはメモリの開発で、トランジスタ・コンピュータと同様に磁気コアを用いることにしたものの、位相差によって表現された情報をうまく保存できるメモリを開発することが、PC-1を作る上でもっとも苦労したところだとされる。

パラメトロンが発明された1954年の時点では、まだコンピュータは研究室で1台ずつ手作りするものという認識で、関連技術の開発も問題だとは認識されなかった。それに対して、コンピュータは工業的に生産される時代には、関連技術の蓄積は重要な問題となった。アメリカでのトランジスタに合わせた技術の蓄積に、日本でのパラメトロン用の技術が追いつけなくなるのは必然的なことだった。パラメトロン・コンピュータが開発された短い時代が終わった後、日本のコンピュータ産業もまた、アメリカと同様にトランジスタ・コンピュータのみを製造するようになった。1950年代にはコンピュータを科学の研究として製作する時代から、産業として量産する時代への移行しつつあったが、その動きの日米での差が、2つの特許の違いに現れている。

註

1 パラメトロンについてはまず1954年5月28日に特許が出願（特願昭29第10907号）されたが、2つに分割されて、「補助変数励振共振子」（1957年9月4日公告，特許出願公告昭32-7103），「補助変数励振共振子による論理演算回路」（1957年8月7日公告，特許出願公告昭32-5953）になった。公告されたときの発明者は後藤英一，出願人は財団法人パラメトロン研究所である。

2 PC-1及びその後に富士通と東大が協力して製作したPC-2に使われた技術については，高橋秀俊編『パラメトロン計算機』岩波書店，1968年に詳しく説明されている。

3 フォン・ノイマンの特許「Non-linear Capacitance or Inductance Switching, Amplify-

ing, and Memory Organs (非線型の静電容量またはインダクタンスの切り替え, 増幅, 記憶器官)」は, フォン・ノイマンが発明者, IBM が譲渡人 (assignor) で 1954 年 4 月 28 日に出願され, 1957 年 12 月 3 日に成立した. 出願時の Serial は No.426,149, 成立時は 2,815,488 である.

4 John von Neumann, “First Draft of a Report on the EDVAC,” Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, June 30, 1945.

5 W. W. Mumford, “Some Notes on the History of Parametric Transducers”, *Proceedings of the IRE*, vol.48, no.5, pp.848–853, 1960.

6 フォン・ノイマンは顧問就任後に問題を引き起こすことを避けるため, IBM の応用科学部長だったハードの助言を受けて, 就任直前に生涯たった一つだけのこの特許を出願した. その後, IBM と製造に関する契約を結んだが, 実現しないまま終わった. ウィリアム・アスプレイ (杉山滋郎・吉田晴代訳) 『ノイマンとコンピュータの起源』産業図書, 1995 年, 241 ページ.

7 山下英男「大型電子計算機の進歩と現状」『エレクトロニクス』1956 年 10 月号, 44–45 ページによると, 1956 年の時点で, アメリカでは「事務用だけでも大小 3000 台」の電子計算機が運用されている一方, 日本では「小型の電子計算機 (UNIVAC60 または 120) が 7 台すでに輸入され証券会社, 電力会社, 保険局等で使用されている」にとどまり, 日本での試作研究は 1 台も完成していないという状況だった.

8 パラメトロンが発明された経緯については, 高橋秀俊『電子計算機の誕生』中央公論社, 1972 年に詳しく回想されている.

9 後藤英一「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」『情報処理』Vol.16, No.1(1975 年 1 月), 39–43 ページ.

10 特許庁の分類 (FI・F ターム) では, 「パラメトロン」は H03K19/162 と H03D13/00@Z になっている. これらの分類に入る特許および実用新案は合わせて 503 件で, 出願年代で見ると 1959 年末までに 281 件, 残りは 1960 年以後に出願されたものである.

11 1955 年 5 月 16 日に出願 (Serial No.508,668) され, 1960 年 8 月 9 日に成立 (2,948,818) した.

- 12 前掲, 高橋『電子計算機の誕生』, 80-82 ページ.
- 13 同一名称の特許が 2 件あって, 出願も同じ 1960 年 5 月 28 日である. 出願公告は S39-11667 と S39-15558, アメリカでの出願による優先権主張も同じ 1959 年 5 月 29 日である.
- 14 R. L. Wigington, "A New Concept in Computing," *Proceedings of the IRE*, vol.47, no. 4 (1959), pp. 516-523. 投稿されたのは, 1958 年 12 月 31 日である.
- 15 『岩波数学辞典』(第 1 版), 岩波書店, 1954 年. Hill の方程式は 152-3 ページ, Mathieu 方程式は 330-2 ページであり, それらを参照している.
- 16 後藤英一「非線型リアクターを利用した新回路素子パラメロン」, 1954 年 7 月の電気通信学会の電子計算機及び非直線理論研究専門委員会資料が, パラメトロン研空所編『パラメトロンの研究 I』, 1959 年, 共立出版の 1-25 ページに収録された. この論文では, N.W. Mclachlan, *Ordinary non-linear differential equation in engineering and physical sciences*, Clarendon Press, 1950 を参照している.
- 17 後藤英一の特許「補助変数励振共振子」.
- 18 Carl L. Isborn, Hawthorne, Calif., assignor, by mesene assignment, to The Nathional Cash Register Company, a corporation of Mary land, " Bistable State Circuit", Application July 25, 1950(Serial No.175,784), Patented Feb. 4, 1958(2,822,480).
- 19 前掲, 高橋編『パラメトロン計算機』, 2-3 ページ.
- 20 同じ名称が異なる特許で何度も使われている. この特許は発明者が後藤英一, 出願が 1955 年 3 月 12 日, 特願昭 30-7573, 出願公告 S32-7104 である. これ以後も, いくつかの解決方法が提案され, 特許として出願された.
- 21 逆結合と飛び越し結合とその最終的な解決法については, 前掲, 高橋編『パラメトロン計算機』, 38-39 ページ, に説明されている.
- 22 後藤が単独の発明者で財団法人パラメトロン研究所が出願人となっているのが 12 件, 他の発明者と共同のもので日本電信電話公社が出願人となっているのが 6 件, 国際電信電話株式会社が出願人となっているのが 1 件, 富士通信機製造株式会社が出願人となっているのが 4 件である.
- 23 喜安善市, 関口茂, 高島実「強誘電体の可変容量によるパラメータ励振」『電気

通信学会誌』第 41 巻, 第 3 号, 1968 年 3 月, 239-244 ページ.

24 後藤英一「パラメトロンとは」『科学朝日』1955 年 11 月号, 83-86 ページ.

25 柄沢忠義・富永滋「第 7 章特殊磁性材料 7. 2 非直線特性と応用」武井武編『フェライトの理論と応用』丸善, 1960 年, 207-219 ページ.

26 前掲, 高橋編『パラメトロン計算機』, 37 ページ.

27 高橋秀俊「解説 計算機の現状」『日本物理学会誌』第 15 巻, 第 2 号, 1960 年 2 月, 70-77 ページ.

28 前掲, R. L. Wigington, "A New Concept in Computing".