

# アナログコンピュータとハイブリット接続を行ったパーソナルコンピュータ MSX<sub>2</sub> による電気回路の CAI に関する研究

植村辰久\*

## 1. 序論

現代社会において、科学技術の発展は著しく、科学分野が統合された形で進んでいる。その中でも特に機械、電気はコンピュータ導入、生産工程、計測の自動化、ロボットの制御等のオートメーション化により広く浸透している。それ故に電気工学や電子工学の専門知識を習得した人の需要も多くなり、その要望に応じて社会的にも学校や家庭において、電気工学、電子工学を学ぶ人が多くなってきている。この電気工学や電子工学を学習する課程においても、最も基礎的なのが電気回路であり、これを十分に理解しておくことにより、電気、電子工学全般を円滑におこなうことができると思われる。

その考えを基に電気回路の学習を実験と理論を併用し、理論値と実験値の比較を学生が求めた計算値と実際の実験回路とコンピュータによる数値解及び波形の表示により、電気現象を確かめながら学習できる CAI システムを試作したので発表する。

## 2. 本装置の必要性

### 2.1 システムについて

学生が電気回路の過渡現象を学ぶとき、

1. 回路方程式（微分方程式）を求める。
2. 初期条件（I.C.）を与える。
3. 1, 2 により、数値解を求める。

ということを行えば少なくとも観念的には、理解できたといえよう、しかし、実際にはこれを波形として捉えられなければ、空論になりがちで、そのためにも実験を行って、把握することが好ましい。

そのような次第でこれを本学電気工学実験Ⅲの一項目として考えた。

私どもの実験の特色として、予め必要な計算等の準備を怠ると実行不可能となることが多い。この過渡現象の実験に於いても、LCR および回路とその定数 LCR 及び回路方程式（微分方程式）の解を計算により正しく求めて置かなければチェックが行えず、実験が無意味となるであろう。しかしながら現象的には初期条件（I.C.）を変化させ、解を求めることは、特に交流過渡現象に於て、計算上かなり複雑になることが多く学生を悩ませる。

そのためまず、パーソナルコンピュータによる CAI システムを試作して発表した。<sup>(1)</sup>

次にこれと実験回路をインターフェイスして

1. 学生が求めた微分方程式とその解を、パーソナルコンピュータ上で行った数値解と

---

\* 理工学部電気工学科助教授 情報工学

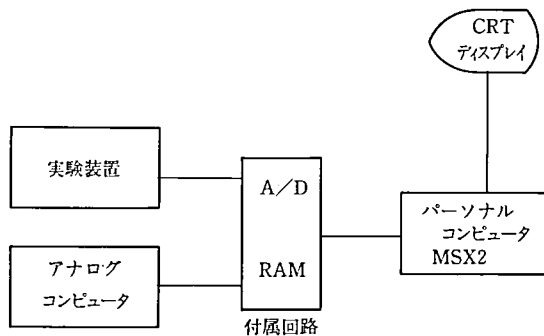
比較して、誤りを発見し得る。<sup>(2)</sup>

2. 演算開始と同時に解の出力波形をパーソナルコンピュータに取り込み、これと学生が計算した結果の解を共に時間波形としてCRT上に出力し比較して、当人の求めた解の妥当性をチェックすることを可能ならしめたシステムを発表した<sup>(3)</sup>。

ここで問題なことは学生全員が過渡現象に限らず連立微分方程式、偏微分方程式等の複雑な微分方程式を解き得るかということである。

そこでアナログコンピュータを使用すると、方程式さえ求まれば、解き方を知らずとも、その方程式通りプログラミングを行うことのみで解波形が求められることに着目して、アナログコンピュータとパーソナルコンピュータのインターフェイスを行い、あたかもハイブリットコンピュータの様に用いることを試みた所、難解な現象が物理的にも数学的にも容易に理解し得る結果が得られた<sup>(4)</sup>。

この結果に基づいて、更に発展させるべく上記のハイブリットコンピュータシステムと前述の実験回路をまとめて、一つのシステムとするための試作を行った。そのためアナログコンピュータにより、回路のシミュレーションを行わせることも可能となり、より多くの効果が期待し得る。このブロック図は第1図に示した通りである。この様な試みが簡単な装置で他で一般的に使用されていることは知られていない。



第1図 システムブロック図

## 2.2 MSX<sub>2</sub> について<sup>(5), (6)</sup>

このシステムの核となるパーソナルコンピュータの機種は従来より用いているMSX<sub>2</sub>形である。この機種は規格統一が行われているために、メーカー全ての各社間の機械の変更によるソフトウェアの変更も必要ない。ハードウェアについても同様に規格統一されているために、全てのMSX<sub>2</sub>機種でソフトウェア、及び実験用電子回路もまったく変更することなく使用できることが理由の一つである。演算能力については、14桁の倍精度実数をサポートし、演算速度はCPUが32ビット形式に対して速いとは言えないが、このクラスでの高精度の演算が可能である。更に理由の一つとして、RAM容量が64KバイトのMSX<sub>2</sub>機で、約3万円程度、8ビット機で流通価格が約一万円台で購入することが可能である。

パーソナルコンピュータを使用して行う学習は本来各個人が一台ずつ。自由に使用できて始めて大きな効果があると言える。しかし学校などに於いての多人数教育について

は一人一台とはいかない場合の可能性も生じよう。かつ授業での時間的な制約もあり、各個人がCAIに対応する個人差も存在し、更に授業中に集中して実行できるか否かの環境もでてくることが考えられる。

このMSX<sub>2</sub>機を利用したCAIを電気工学実験Ⅲに用いるのみでなく、授業及び家庭で学習することをも考慮した。本体のみを大学などで貸与するにせよ、価格及び製品の流通に関して十分に入手可能である。さらに理由の一つにディスプレイは家庭にある一般のTVを活用することができるので、特に購入する必要はないことが挙げられる。又、このCAIのソフトウェアは簡単にROM化が行えるので、これを内蔵すればフロッピーディスク装置は不要である。

それゆえに家庭における学習もさらに簡便になり、簡単なハードウェアの回路を自作することにより、実際の電気回路の現象と原理の双方を学習することが可能である。

その結果として、学習レベルが向上してこの目的に関しては、不要となり、仮に自作の回路を処分したとしても惜しむ程の額にはならないと思われる。そのために受講者全員が各自携帯して、自宅学習の効果とその他の応用の訓練ができる。更に、システムを持つ者と、持たない者の不平等もなく教育機会均等の授業が行える。

言うまでもなく、このMSX<sub>2</sub>機は一般に広く用いられており、著名でもあるため、OSとして、MSX-DOS、ソフトウェアとしてワープロを始め、各種の事務処理ソフト、更に、ゲームソフトはPC98シリーズと同じ程度に揃えられており、その点からも過去の産物ではなく、将来も存在することが期待できよう。この様な身近に入手し得る機種で、ソフトウェアに興味を抱け、かつ電気回路等の専門知識が身につけられ、一般的な利用ができるというメリットが本システムにMSX<sub>2</sub>機を使用した理由である。

### 3. システムの概要

このCAIは前述のように電気回路および過渡現象の基礎学習用であり、アナログコンピュータによるシミュレーションにより理論的に理解し、実際の実験回路を組んでその実験より計算値を確認しながら、電気回路等の基礎学力を修得するためのシステムである。

#### 3.1 アナログコンピュータ

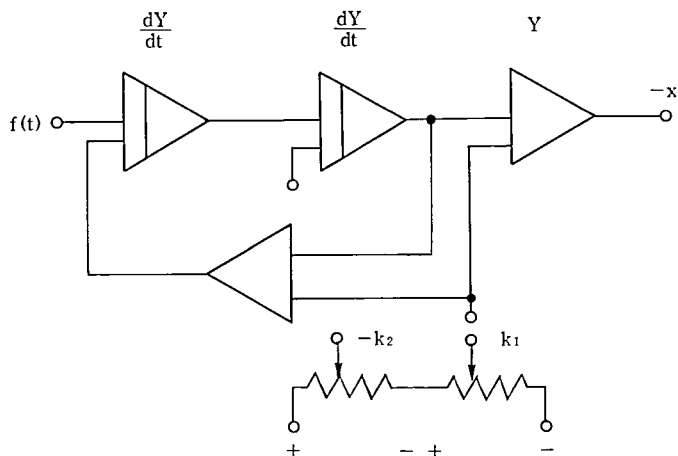
3年生として、過渡現象などに必要な微分方程式に対する知識は2階1次定数係数非斉次形の解が完全に求められればほぼ満足できると言えよう、従って方程式は下記の(1)に示した様に

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = f(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

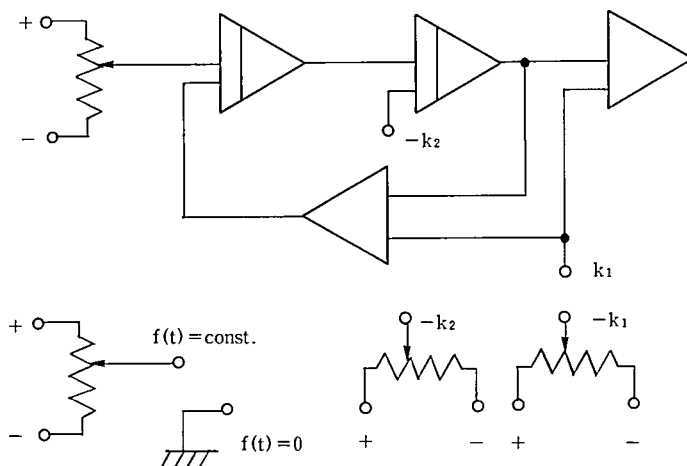
I.C.として、 $t=0$ の時  $x=k_1$   
 $\frac{dx}{dt}=k_2$

$$\left. \begin{array}{l} f(t) \text{ として,} \\ f(t) = 0 \quad (\text{斉次}) \\ f(t) = \text{const.} \\ f(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \end{array} \right\} \cdots \cdots (2)$$

a:  $a \frac{d^2Y}{dt^2} + b \frac{dY}{dt} + cY = f(t)$  I.C.;  $t=0$  のとき  $Y=k_1, \frac{dY}{dt}=k_2$  のブロック図



b: 時間関数  $f(t)=0$   $f(t)=\text{const.}$   $f(t)=A\sin(\omega t + \phi)$  のブロック図



第2図 アナログコンピュータ ブロック図

と表現される形式が考えられよう。

この方程式の解を求めるプログラミングの形式及び発生器はブロック図として第2図に示した通りである。ここで考慮すべきは

1. スケールファクタの変換即ち、計算などの実電圧、電流などの範囲と、アナログコンピュータの取り扱う電圧の範囲の差の問題
2. タイムスケールファクタの変換、即ち計算などの時定数、共振周波数とアナログコンピュータが取り扱える周波数範囲の差の問題が挙げられる。

### 3.2 スケールファクタの変換

アナログコンピュータでは電圧として  $x$  を取り扱うので実際の物理量 ( $Y$ ) と、取り扱

える  $x$  の電圧範囲（本器は +15V）との間に換算係数（ $e$ ）が一般的に必要となる。

これは  $x=eY$  と表記すれば

$$\begin{aligned}
 x &= eY \rightarrow Y = \frac{x}{e} \\
 \left. \begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= \frac{dY}{dt} = e \frac{dY}{dt} \rightarrow \frac{dY}{dt} = \frac{1}{e} \frac{dx}{dt} \\
 \frac{d^2x}{dt^2} &= e \frac{d^2Y}{dt^2} \rightarrow \frac{d^2Y}{dt^2} = \frac{1}{e} \frac{d^2x}{dt^2} \\
 &\vdots \\
 \frac{d^nx}{dt^n} &= e \frac{d^nY}{dt^n} \rightarrow \frac{d^nY}{dt^n} = \frac{1}{e} \frac{d^nx}{dt^n}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

となり、全ての係数を  $e$  倍した方程式となる。

### 3.3 タイムスケールファクタの変換

例えば、回路の共振周波数を求める際シミュレーションに際して、解の指示時間範囲を設定せねばならぬ、高速度形（繰り返し形）の場合、掃引時間は 10msec が普通であるので解の共振周波数を  $f: 300\text{Hz} \sim 1\text{KHz}$  程度になる様に方程式を変換する必要が生じる。

実時間を  $\tau$ ，換算係数を  $g$ ，計算機時間を  $t$  とすると

$$\begin{aligned}
 t &= g\tau \dots\dots\dots (4) \\
 \left. \begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= \frac{dY}{d(g\tau)} = \frac{1}{g} \frac{dY}{d\tau} \rightarrow \frac{dY}{d\tau} = g \frac{dx}{dt} \\
 \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{d^2Y}{d(g\tau)^2} = \frac{1}{g^2} \frac{d^2Y}{d\tau^2} \rightarrow \frac{d^2Y}{d\tau^2} = g^2 \frac{d^2x}{dt^2} \\
 &\vdots \\
 \frac{d^nx}{dt^n} &= \frac{d^nY}{d(g\tau)^n} = \frac{1}{g^n} \frac{d^nY}{d\tau^n} \rightarrow \frac{d^nY}{d\tau^n} = g^n \frac{d^nx}{dt^n}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

これをまとめると、実時間の方程式は

$$A \frac{d^2Y}{d\tau^2} + B \frac{dY}{d\tau} + CY = f(\tau) \dots\dots\dots (6)$$

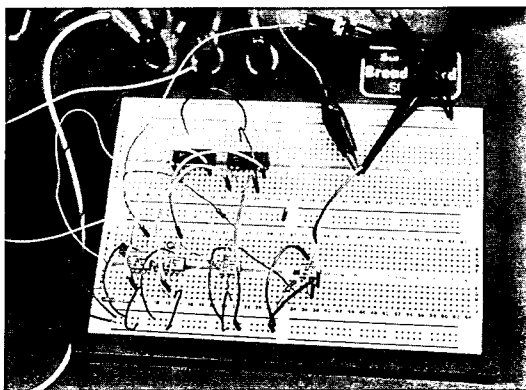
$$A \frac{g^2 d^2Y}{e dt^2} + B \frac{g dY}{e dt} + \frac{1}{e} Y = f\left(\frac{t}{g}\right) \dots\dots\dots (7)$$

と変換される。

タイムスケールムファクタの変換が学生にとり、少々厄介となるので、このための予備実験をサーボ特性解析装置<sup>7)</sup>に組み込まれている繰り返し周波数が可変の高速度アナログコンピュータにより行った所、好結果であった。そのため後述の如くサンプリング速度を可変にして周波数を  $f$  として、2/3Hz より 2.5Kz に至るまでにおさまればよいように設計して、この問題の解決法の一助とした。

又、解析指示装置として、低速度形にもかかわらず MSX<sub>2</sub> の CRT を用いるので X-Y レコーダ、及びペンレコーダは不用で、これに対する制御信号も必要がなく、この点もこのシステムのメリットと言える。

実験用としては、学生にユニバーサル基盤（サンハヤト製 SRH-32）上に組立させ



第3図 自作実験セット

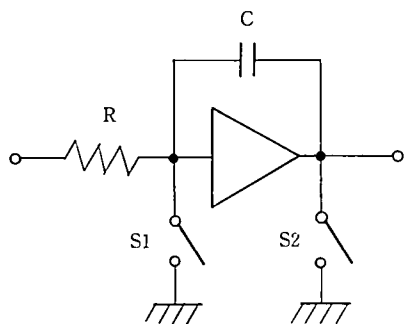
た。そのセットの一例を第3図に写真として示した。演算増幅器としてTI社製 TL081 CP, 制御用リレーとしてサンヨー工業製 UCM-105RT を用いた。

考慮すべき点は、学生の技術レベルでの

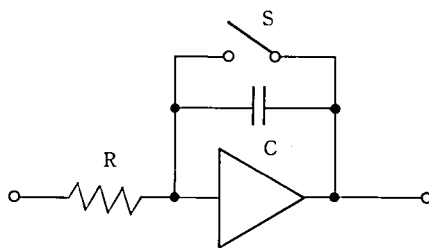
1. コンデンサーの放電の制御

2. アナログコンピュータの演算開始時間（スタート）と、MSX<sub>2</sub> への読み込み開始時間の制御

が挙げられる。



a. 一時的なスイッチの形



b. 本システムのスイッチ

	S1	S2	S
演算時	OFF	OFF	OFF
演算保持 (ホールド)	ON	OFF	
演算停止	ON	ON	ON

c. 動作時に於ける比較

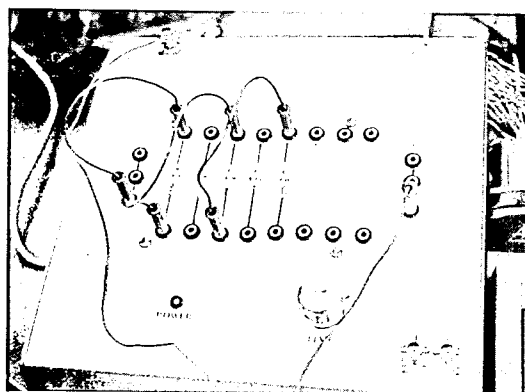
第4図 積分コンデンサーの放電

1. に対しては、第4図aに示す。正規の形に対して、bに示すリレー一個で行う形式として解決した。各動作に対する接点の有様はcに示した通りである。

正規の形であるリレー接点の入力側をON, 出力側をOFFにすることにより Hold が行えるが、今回のbの形ではこれが行えない。しかしながら現在我々が目標としているシステムでは Hold は不必要なので実用上何等差し支えない。

2. に関しては、スタートボタンを設け、これにより直流でスタート信号をアナログコンピュータ（積分コンデンサの接点を off にする）と MSX<sub>2</sub> 側に同時に送り出すことで解決した。

実験装置は、第5図に写真として示した。次に掲げる電気回路の実験が行える構成になっている。



第5図 実験装置

- (1) 抵抗の交流特性
- (2) コンデンサの交流特性
- (3) コイルの交流特性
- (4) C-R 回路の交流・電力特性
- (5) R-L 回路の交流・電力特性
- (6) R-C 回路の交流・電力特性
- (7) R-L 直列回路の過渡現象
- (8) R-L-C 直列回路の過渡現象

この電気回路実験装置は、総合的な印加電圧と回路電流及び個々の素子に流れる電流の測定結果がかつ自動的にパーソナルコンピュータに取り込まれる仕組みになっている。

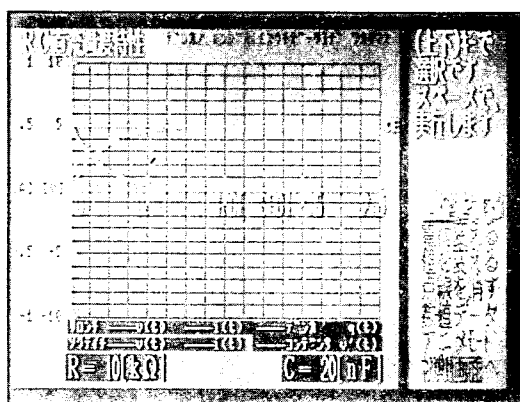
パーソナルコンピュータのハードウェアは、64K バイトの容量をもつ1ドライブのディスクユニット付きの MSX<sub>2</sub> 機と家庭用の TV, そして A/D 変換用の付属回路で構成されている。ソフトウェアは MSX ベーシックで作成されている。(紙面の関係で省略、公開の準備有)。

結果の表示は、計算値、実験値、シミュレーションにより求めた値をそれぞれ時間波形として、色別にディスプレイされる。

オペレーションとしては、メニュー方式を採用した。まず画面より上記8項目より各自希望する実験の項目を選択すると、その項目の回路図と、計算式が初期画面として同一画面上に表示される。その表示された計算式より回路定数を求め、パラメータとして入力する。回路図と計算式が同一画面上にあるので、回路定数が求めやすくなっている。

パラメータのセットが終わると、自動的に次の画面の特性表示画面へ移り、特性及びその現象の結果を学習者がはっきり認識して理解するために各波形ごとに色別してグラフィック表示される。

そこで学習者は初期画面または、メニュー画面に戻すことができ、初期画面を指定した場合にはパラメータへの変更を繰り返すことにより、電気回路の特性及び現象の変化をグラフで学習することを可能とした。<sup>(8)</sup>



第6図 RC 直流過渡特性表示図

更に、本システムでは計算上及び実験装置の各オペレータを同一にしておくことにより実際の電気回路の出力波形を読み込み、ディスプレイの同一画面上で計算値と実験値を同時に表示することができる。この様にして学習者は理論と原理を実験からも習得することができ、一層の興味を持ち理解することが可能となった。又、同一画面上に計算値と実験値をグラフィック表示するため、双方の結果の比較、検討を実際その場で直ちに行うことが可能である。

#### 4. 付属回路の概要

前述の実験回路より、データを取り込むが、この出力はアナログ量であるため電気回路の出力とパーソナルコンピュータとの間にインターフェイスを行うためにA/Dコンバータシステムが必要である。そのシステムブロック図は第1図として示す。

実験回路の出力波形は8ビットの、A/DコンバータAD670でデジタル化され、この信号データは、一旦外付けの2KB、RAM6116にバッファとして一時的に蓄えられる。これを2組（書き込み用と読み出し用）にバンク切り替えを行った。これは出力の周波数が高く、1KHz～10KHzにあるため、直接MSX<sub>2</sub>機で、読み込む速度はアセンブラ言語を使用しても、最大で5KHzが限度であり入力周波数10KHzの場合のサンプリングは不可能であるが、バッファとして用いたRAMに書き込んでしまえば、サンプリング

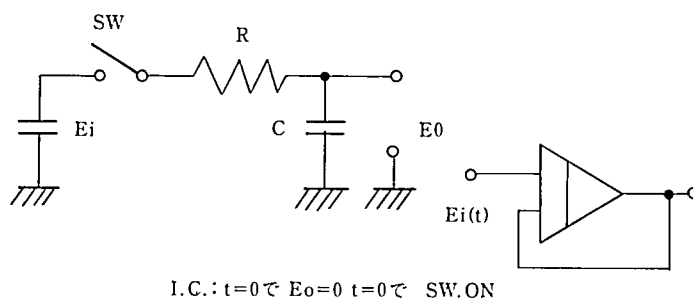


速度に無関係となり、BASIC 言語を使っても十分読み込むことが可能となる。

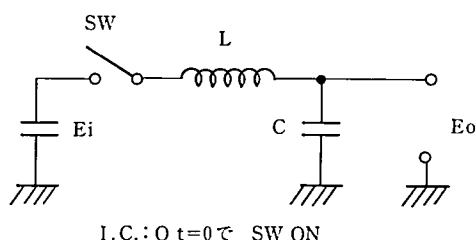
尚、A/D コンバータ (AD670) のサンプリング速度は、最大 50KHz であり、任意に変えるので、1KHz, 2.5KHz, 5KHz, 10KHz, 25KHz, 50KHz, を用いている。

出力波形は外付けの RAM に書き込まれているため MSX<sub>2</sub> 機でグラフィックス表示する時に、どのような操作もソフトウェアで可能となり、理論値で表示した特性に合わせ、実験の表示をスタートするようにしてある。このことは理論値と実験値を比較、検討のうえで、大きなメリットであることと思われる。

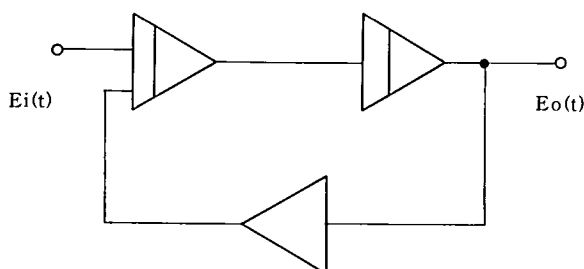
波形の取り込み時間はバッファ 2KB に対しサンプリング速度が 1KHz-50KHz であるので最大 2sec, 最小 40ms である。従って実験回路の L, C, R は過渡現象がこの時間内に計測し得るような範囲に予め与えてある。



a. 最も基本的な直流過渡現象



b. 共振回路の過渡現象



シミュレータ回路図

第7図 共振回路の過渡現象

## 5. 実験結果

まず最も基本的な直流過渡現象について行った。回路図及びシミュレータ回路図は第7図として示した。

方程式は

$$E_o(s) = \frac{1}{1+SCR} E_i(s) \dots\dots\dots (8)$$

条件 I.C. = 0  $t=0$  で SW. On

故に

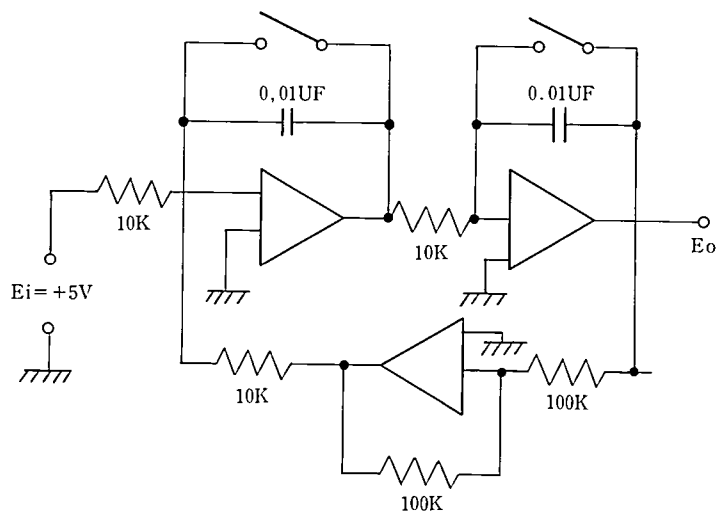
$$E_o(t) = E_i \left( 1 - e \exp \left\{ -\frac{1}{CR} t \right\} \right) \dots\dots\dots (9)$$

であり、今、 $C=20\text{nF}$   $R=10\text{K}\Omega$  と与えたときの、学生が行った出力電圧とコンデンサに流れる電流の計算値、実験装置よりの出力及びシミュレータ（アナログコンピュータ）からの出力（CRT 上）を第6図と示した。

時定数  $CR=0.2\text{msec}$  であり、学生の出力電圧に対する計算誤りによる結果が曲線のずれとなって表れているほか、殆ど一致して良好な結果を得ている。

次に  $L$  を含む回路について LC 共振回路の過渡現象の実験を行った。

回路図及びシミュレータの回路図を第7図に、実際に用いたアナログコンピュータの回路図を第8図としてそれぞれ示した。



第8図 アナログコンピュータの回路図

方程式は

$$E_o(s) = \frac{1}{1+S^2LC} E_i(s) \dots\dots\dots (10)$$

条件: I.C.:  $t=0$  で  $E_o=0$

$t=0$  で SW On

故に

$$E_o(t) = E_i \sin \omega t \dots\dots\dots (11)$$

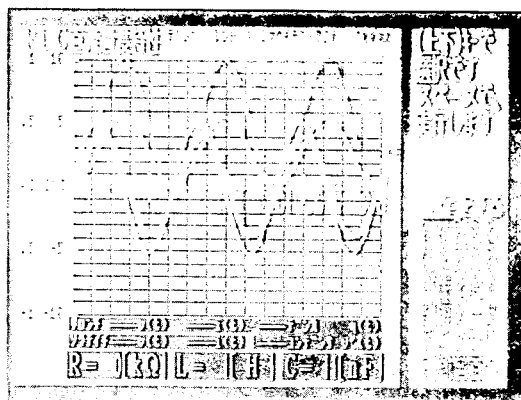
ただし

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (12)$$

実験で与えた  $L=1\text{H}$   $C=11\text{mF}$  を用い、理論値、シミュレータからの出力、実験回路からの出力及び電源電圧、各回路電流及び電荷の時間的変化の値を第9図に示した。理論値は

$$\begin{aligned} (12) \text{ 式より} \quad \omega &= 9520 \\ \therefore f &= 1520\text{Hz} \\ \therefore T &= 1/f = 0.658\text{ms} \end{aligned}$$

が得られた。結果はそれぞれが殆ど一致して良好であると言える。



第9図 RLC 直流過渡特性表示図

ただ図として掲げるに当たって CRT 及び原画もカラー表示なので識別は容易であるが、モノクローム写真では、曲線が重なって判然としないので計算値を故意に振幅のみ異なるようにして曲線の様子が判明するように考慮し、かつ誤ったときに判断を行う参考にした。これらの実験は

1. 回路図と回路定数を与える。
2. 計算を行う。
3. シミュレーションを行う。
4. 実験装置を回路図に従って結線する。
5. 結果を CRT 上に理論値とし共に表示を行う。

の順で行えば学生自身で正しく計算及び実験が行えたか否かの判断が可能になり、理解が迅速にかつ深められるであろう。

又、シミュレータについても同様であるのでアナログコンピュータを問題解決のツールとして自在に使用し得ることが可能であると考えられよう。

本 CAI を毎年本学の電気工学科一年次生より卒業研究生まで 10 数名づつを対照に実

施した結果、電気回路の過渡現象が定性的、定量的に理解し易くなったという結果を得た。

更に、アナログ、デジタル双方の、コンピュータに対する興味と関心を持たせることができた。問題点として、学生実験として考えると、一回分としては、過大ではあるまいかとの意見があった。又、2年生以下にはアナログコンピュータのプログラミングを教えておく必要があると言えよう。

教育効果の上がる実験装置として有用である。又、電気工学実験に用いれば自作装置であるためアナログコンピュータも同時に学べるなど優れた効果を得られるよう。

## 6. 結論及び謝辞

本システムは電子・電気工学の電気回路などの学習に際しては理解しやすく教育効果の上がる実験装置として有用である。又、電気工学実験に用いれば自作装置であるためアナログコンピュータも同時に学べるなど優れた効果を得られよう。

この研究をまとめるに当たって多大な御配慮と御助力を賜った志方泰教授、そして製作と実験と資料に御援助をいただきました杉本雅彦氏に深謝いたします。又、数年に渡り製作と実験に携わった、職員、研究生、そして多くの学生に対し感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 杉本雅彦「MSX による電気回路実験用 CAI」S. 62, 私情協大会
- (2) 三谷政昭：パソコンで学ぶ基礎電気回路, 森北出版株式会社
- (3) 志方, 和田, 杉本「MSX による電気回路実験用 CAI に関する研究」H. 1, 電学全大 1
- (4) 志方, 杉本, 石井「MSX とアナログ・コンピュータのハイブリット接続による CAI システム」H. 3, 信学秋大
- (5) 荻屋公明, 高山茂：MSX 規格マイクロコンピュータで作った直観的動画面利用講義教育効果の評価, 日本工業教育協会第 35 巻, 第 3 号 1987. 7
- (6) MSX テクニカルハンドブック：アスキー出版局
- (7) サーボ機構特性解析装置の試作  
S35 信学全大 27 志方, 中原, 橋本
- (8) 武者利光, 寺町康昌：パソコン・グラフィックスデータ処理信号解析, オーム社