

電気回路の学習におけるコンピュータの活用

西山 保子*・三原 伸哉**

(平成6年4月28日受理)

要 旨

電気回路における現象をわかり易く、実感として捉えられるようにすることを目的として、電子回路の学習にコンピュータを活用するためのプログラムを開発した。このプログラムはRC直列回路におけるコンデンサの充電と放電、RLC直列回路における減衰振動、ダイオードによる半波整流・平滑回路の実験がメニュー方式で実行できるようになっている。そのため、普通のオシロスコープを用いた実験では困難である過渡現象の観測、回路定数の測定およびシミュレーションを簡単な操作で行うことができる。また、電源として電池を用いることが可能であり、理解しやすい回路が構成できること、回路定数の異なる現象を同時に表示して比較することができることなど利点が多い。このプログラムを用いて減衰振動の実験を行い、減衰振動と回路のQ値の関係および基本的な回路素子であるコンデンサの種類による対数減衰率の違いについての考察を行った。

KEY WORDS

| | | | |
|---------------------|-----------|-------------------|------|
| use of computer | コンピュータの活用 | electric circuits | 電子回路 |
| transient phenomena | 過渡現象 | measurement | 測定 |
| simulation | シミュレーション | Q-value | Q値 |

1. はじめに

最近、学校教育現場においてもコンピュータの活用が注目されており、特に学習指導におけるパソコンの活用の実践的研究が盛んに行われている。物理の学習、主として実験におけるパソコンの活用法としては、計測とシミュレーションであり、数多くの報告がなされている。しかし、多くの報告は計測のみ^{(1),(2)}、あるいはシミュレーションのみ^{(3),(4)}であって、両方をシステム化したものはほとんどない。また、物理の学習の中で電気回路に関するものは嫌いな生徒や学生が特に多い。そこで、本研究では、電気回路における現象をわかり易く、実感として捉えられるようにすることを目的として、計測とシミュレーションの両方を行うことのできるプログラムを開発した。一般に、電気回路実験ではオシロスコープ上の電圧波形を観測するため、現象は周期的に起こらなければならないので、電源として関数発生器を用いる。たとえば、RC直列回路における過渡現象の場合にも電池のON-OFFの代りに関数発生器の矩形波電圧を用

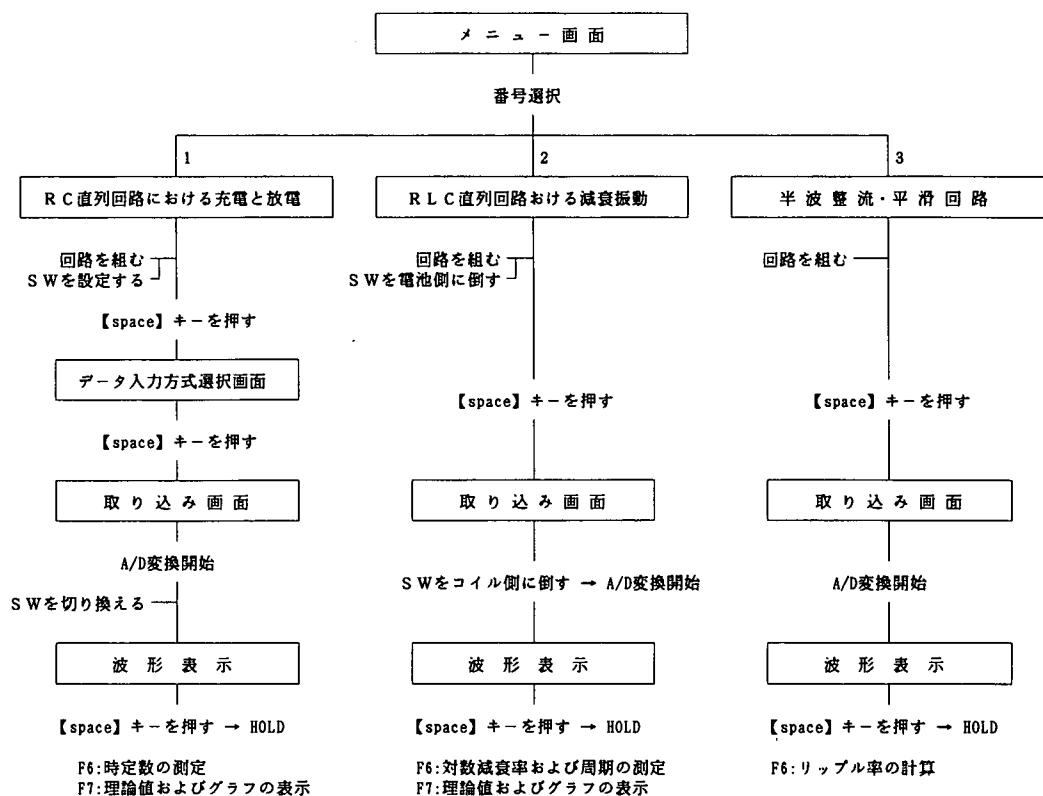
* 自然系教育講座

** 現在の勤務先：静岡県静岡市立観山中学校

いる⁽⁵⁾。このことが電気回路における理解を妨げている一因ではないかと考え、電源として電池を用い、パソコンをメモリスコープの機能として用いることにした。実験課題として、基礎的な電子回路実験である、① RC 直列回路におけるコンデンサーの充電と放電、② RLC 直列回路における減衰振動、と①の応用として、③ダイオードを用いた半波整流・平滑回路を取り上げた。開発したプログラムを用いて行なった実験のうち、②の減衰振動の実験について報告する。

2. プログラムの概要

このプログラムは PC-9801F (メモリー 384kB, A/D 変換ボードとトリガーユニット (カノーパス電子㈱製 ADX-98H, ADT-98E) を装着) において、N88-日本語 BASIC (86) (MS-DOS 版 Ver. 6.0) により作成したもので、上に挙げた 3 つの実験について、計測とシミュレーションの両方を行うことが可能である。プログラムの構成と機能について以下に述べる。



プログラムは図1に示すように実験課題を選択するメニュー画面、実験の簡単な説明と回路図の画面(図2)およびデータの取り込みと波形表示の画面(図3)で構成されている。実験者が説明文を読んで、回路図の通り回路を組み、指示にしたがって実験が簡単に行なえるように、また、計測値とシミュレーションの値の比較が容易に行なえるように、プログラムは次のような種々の機能を備えている。

- ①必要な機能をファンクションキー(図3の枠外の表示)に組み込んだことにより、簡単な操作で実験を行なうことができる。
- ②取り組んだ波形データの保存、保存データの読み込み、およびファイル名の一覧表示をすることができる。
- ③取り込んだ波形を0.25～4倍の範囲で拡大および縮小ができる。
- ④トリガー機能により、ある条件を満たした時点からデータの取り込みができる。
- ⑤サンプリング周波数の範囲が0.2Hzから100kHzと広く、速い現象から遅い現象まで測定できる。
- ⑥速い現象にたいしてはデータを読み込んでからグラフを描き、遅い現象にたいしてはデータを読み込みながらグラフを描くことができる。

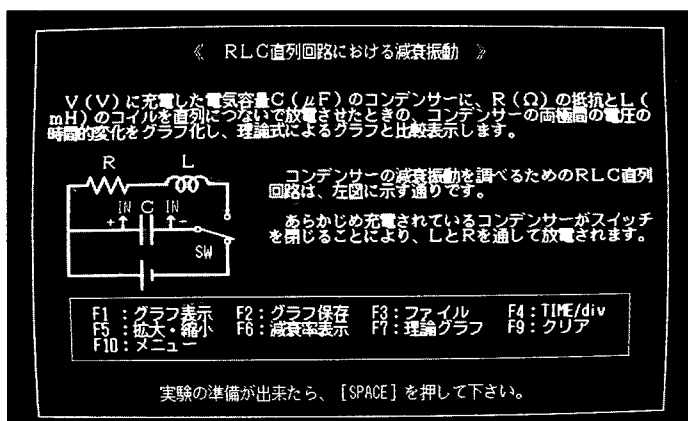


図2 RLC 直列回路における減衰振動の説明図

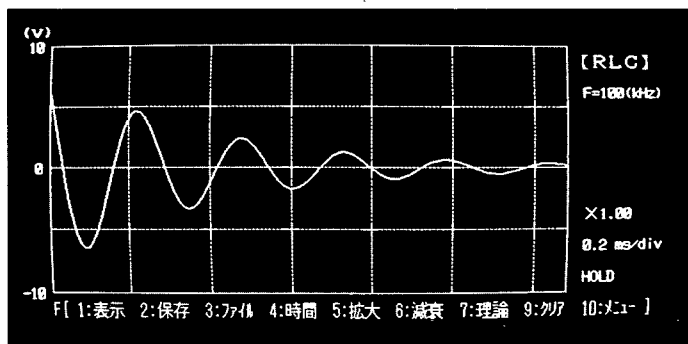


図3 A/D 変換された減衰振動波形

⑦カーソル機能を用いて、種々の測定ができる。図4は減衰率測定の場合で、連続した4つの極値にたいするy座標の値から、平均の減衰比および対数減衰率を計算して表示する。周期も同様の方法で測定できる。

⑧どの実験も同じ手順で操作できるようになっている。

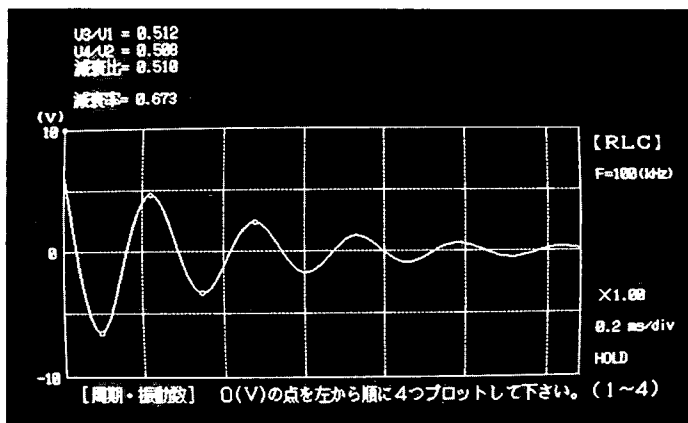


図4 対数減衰率の測定

3. プログラムの活用

3.1 コンデンサの種類と対数減衰率

RLC 直列回路において、電圧 E に充電されたコンデンサの両端の電圧は

$$e_c = E \exp[-t/\tau] \cos \omega t \quad (1)$$

にしたがって減衰する。ここで、時定数 $\tau = 2L/R$, 角周波数 ω は $\omega^2 = \omega_0^2 - 1/\tau^2$, $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ である。また、対数減衰率 Λ は周期 T を用いると

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\omega\tau} = \frac{T}{\tau} \quad (2)$$

で表され、減衰が大きいほど Λ が大きい。

$R=5.00\Omega$, $L=4.22\text{mH}$, $C=0.494\mu\text{F}$, $E=9\text{V}$ の場合の取り込んだ波形①と(1)式で計算した波形②を図5に示す。①の波形は②の波形よりも減衰が大きく、周期も短いことがわかる。コイルの内部抵抗を考慮した波形③において、周期は②の波形の場合とほとんど変わらないが、減衰の程度は取り込んだ波形①に近くなる。このようにコイルの内部抵抗は無視できないものであることがわかる。そのほか、コイルや抵抗には固有の電気容量があり、コンデンサにも損失抵抗がある。

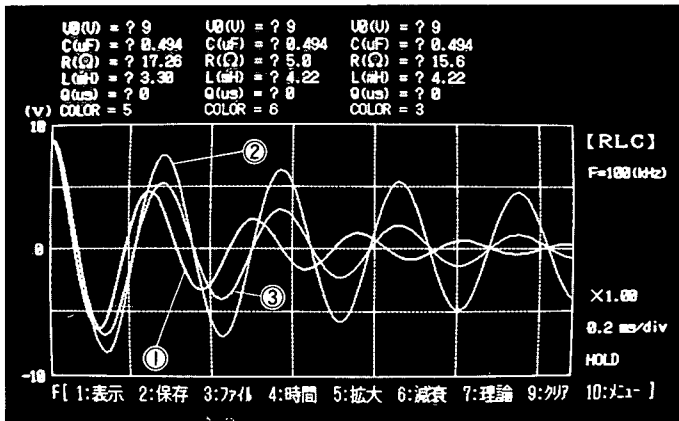


図5 減衰振動の取り込み波形と計算による波形

$R=5.0\Omega$, $L=4.22\text{mH}$
(内部抵抗 10.6Ω), $C=0.494\mu\text{F}$, 電池 9V (006P) を使用

①取り込んだ波形, ②上の値から計算した(1)式の波形,

③コイルの内部抵抗を考慮して計算した波形

そこで, 抵抗とコンデンサーの種類を変えて周期と対数減衰率を測定した。コイルは $L=4.22\text{mH}$ (内部抵抗 $r_L=10.6\Omega$) を用いた。抵抗器は炭素皮膜抵抗器 ($1/2\text{W}$, 5.0Ω), 金属皮膜抵抗器 ($1/2\text{W}$, 5.1Ω), 金属酸化物皮膜抵抗器 (3W , 5.1Ω), セメント抵抗器 (5.1Ω) の4種類である。減衰振動の波形に差は現れなかった。これは抵抗値が小さいためと思われる。5種類のコンデンサー (公称容量 $0.47\mu\text{F}$) では, 異なる減衰振動の波形が得られた。それぞれの周期および対数減衰率の値を交流ブリッジで測定した電気容量 (μF) および損失抵抗 (Ω) の値とともに表1に示す。公称値が同じでも実際の容量は $0.542\sim 0.424\mu\text{F}$ と異なっている。また, 損失抵抗は種類によって大きく異なり, アルミ電解, タンタル電解やセラミックでは $5\sim 12\Omega$ と大きく, マイラやフィルムでは約 0.2Ω と非常に小さい。数値は個体によって少し異なるが, この傾向は変わらない。周期および対数減衰率では, Aと記されたものが測定値であり, Bは計算値である。計算に際して, 電気容量 C は表中の値を, 抵抗値はコンデンサーの損失抵抗 r_c およびコイルの内部抵抗 r_L を考慮して, $R+r_c+r_L$ を用いた。周期の値は電気容量の大ききの順に大きく, 損失抵抗の影響は少ない。対数減衰率は損失抵抗の大きいアルミ電解, タンタル電解, セラミックで大きく, 損失抵抗の小さいマイラ, フィルムで小さい。 $\Lambda=0.634$ のマイラの波形は図5の①である。また, 同図の波形②では $\Lambda=0.17$, 波形③では $\Lambda=0.53$ である。

表1 コンデンサーの種類による損失抵抗と周期および対数減衰率の関係

| コンデンサーの種類 | 電気容量 (μF) | 損失抵抗 (Ω) | 周期 A (ms) | 周期 B (ms) | 対数減衰率 A | 対数減衰率 B |
|-----------|------------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|---------|
| 積層セラミック | 0.542 | 8.15 | 0.271 | 0.303 | 0.738 | 0.853 |
| マイラ | 0.494 | 0.243 | 0.258 | 0.288 | 0.634 | 0.540 |
| タンタル電解 | 0.492 | 5.18 | 0.258 | 0.288 | 0.797 | 0.709 |
| フィルム | 0.466 | 0.215 | 0.245 | 0.280 | 0.600 | 0.524 |
| アルミ電解 | 0.424 | 11.7 | 0.236 | 0.268 | 0.801 | 0.868 |

3.2 減衰振動と回路の Q 値

RLC 直列回路の Q 値は減衰の時定数 τ を用いると、

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\omega_0 \tau}{2} \quad (3)$$

で表される⁽⁶⁾。 $\omega \doteq \omega_0$ のとき、

$$Q \doteq \frac{\omega \tau}{2} = \pi \frac{\tau}{T} = \pi \frac{1}{\Lambda} \quad (4)$$

とも書ける。したがって、Q 値は τ/T に比例すること、また、対数減衰率 Λ に逆比例することがわかる。さらに、 $\pi\tau$ の時間で振幅は初期値の 5% 弱になるので、それより大きな振幅の波の数が Q 値に等しいことになる。図 5 の波形①は約 5 周期分が現れており、後は非常に小さい。この場合、 $T=0.258\text{ms}$ 、 $\Lambda=0.634$ より、 $Q=5.0$ である。

また、減衰振動が現れる境界は $\omega_0\tau=1$ の臨界減衰で、このとき、(3)式より $Q=1/2$ である。これにたいするシミュレーション波形は図 6 の①の示したように、電圧が単調に減衰して 0 になる。 $Q=1, 2, 3$ に対する波形②, ③, ④から $Q \geq 2$ のとき、はっきりとした減衰振動の観測が可能であり、Q 値の増加とともに波の数が増加することがわかる。

また、Q 値は、通常、共振周波数を共振の半値全幅で除した値と定義し、共振の鋭さを表すものであると説明している。実験的には RLC 直列共振回路におけるインピーダンスの周波数特性から定義にしたがって求めているが、具体的なイメージがわからないためか理解されていない。そこで、上に述べた減衰振動の波形と Q 値の関係を提示し、Q 値がその回路の減衰の程度を表わすものであることをこれまでの説明に加えることによって、Q 値の理解を助けることになると思われる。

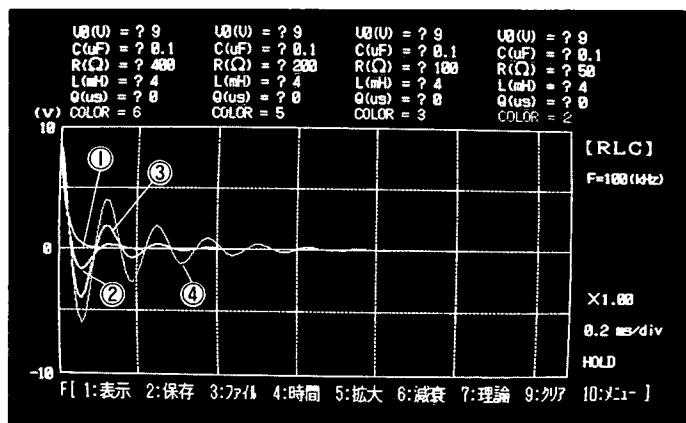


図 6 種々の Q 値にたいする減衰振動のシミュレーション波形
波形①: $Q=1/2$, 波形②: $Q=1$, 波形③: $Q=2$, 波形④: $Q=3$.

4. オシロスコープを用いた実験との比較

図5に示した減衰振動は観測時間が約1.2msと短いため、メモリー機能をもたない普通のオシロスコープ(OSC)上で観測することは困難である。同様な波形をOSC上で観測するためには、図の観測時間を1/2周期とする周波数約400Hzの矩形波を使用すればよい。実際に、電池のかわりに関数発生器(FG)を接続してOSCで観測しようとしたが、減衰が激しく、減衰振動は観測されなかった。これはFGが回路に直列に接続されているため、FGの内部抵抗によると思われる。上述したように、減衰振動の観測には $Q \geq 2$ が必要である。したがって、 $L/C \geq 4R^2$ となるように、 L の大きいコイルと C の小さいコンデンサーを用いることである。そこで、抵抗器は使用せず、10Hのチョークコイル(内部抵抗79.5 Ω)と0.494 μ Fのコンデンサーを用いて実験を行なった。図7は周波数3 Hzの矩形波を用いてOSCで観測したものであるが、掃引が遅く、画面上で周期や対数減衰率を直接測定することは困難であった。そのため、パソコンに取り込んだ波形から、 $T=14.7$ ms, $\Lambda=0.587$, $\tau=25.0$ ms, $Q=5.3$ を得、これから回路の抵抗成分は880 Ω と大きいことがわかった。

以上のように、減衰振動を普通のオシロスコープで観測するには制限が伴うので、OSCの画面上で観測するための条件を検討する。初期値の5%の振幅まで観測するためには矩形波は $2\pi\tau$ の周期が必要である。また、画面上で見やすいためには、この周期が50ms以下、すなわち、 $\tau \leq 8$ msが必要である。このとき L は $4R^2C \leq L \leq 4 \times 10^{-3}R$ を満たす必要がある。たとえば、 $R=1$ k Ω のとき、 $4 \times 10^{-6}C \leq L \leq 4$ より、 $C \leq 1$ μ Fとなる。

このように、減衰振動を普通のオシロスコープで観測する場合のコイルやコンデンサーの制限は非常に厳しい。一方、パソコンを用いた実験では、電源としてFGを用いる場合でも観測時間の制限がなく、 $Q \geq 2$ の制限からコイルのインダクタンスが大きいことのみが必要である。また、電池を用いる場合には、コイルのインダクタンスに特に制限はないが、小さいものを用いる場合には、コンデンサーは3.1節で示したマイラやフィルムのように損失抵抗の小さいものが適する。

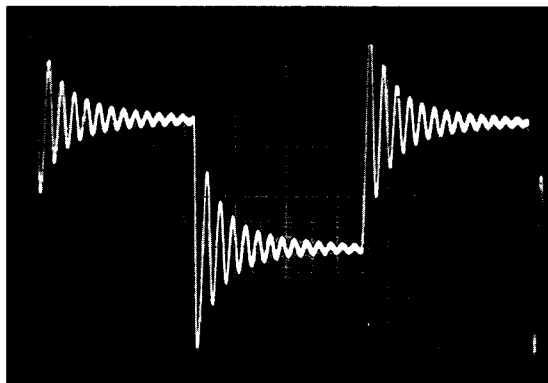


図7 オシロスコープで観測した減衰振動の波形
 $L=10$ H, $C=0.494\mu$ F, 矩形波 3 Hz 使用

5. おわりに

開発したプログラムを用いると、簡単な操作で、基礎的な電子回路実験ができ、従来から行なわれているオシロスコープによる実験より次の点で優れている。

①メモリスコープの機能を備えているため、電源として電池、関数発生器のいずれを用いても、過渡現象の実験が容易にできる。4節で述べたように、普通のオシロスコープでは電池を用いるのは困難であり、また関数発生器を用いる場合にも回路素子の選択に制限があり、計測は困難である。

②シミュレーションの機能を備えているので、図5のような測定値とシミュレーションによる計算値の比較が容易にできること、また、シミュレーションによって、目的にあった回路素子をみつけたり、実験では困難である現象、たとえば、図6の①の臨界減衰なども画面に表示することができる。

さらに、このプログラムは波形の保存や読み込みができ、プリンターへの出力も可能で、操作が簡単であることから、教師の演示実験はもとより、学生実験や生徒の自主的な学習、クラブ活動などにオシロスコープよりも効果的に活用できると考える。

引用文献

- (1) 岸本俊祐, 岡田 正: 物理教育 30 (1982) 60.
- (2) 平田邦男, 山田盛夫: PC-9801 BASIC 制御によるパソコン物理計測入門(共立, 1991).
- (3) M. Leonard Shaevel: Phys. Teacher, 19 (1981) 324.
- (4) 平田邦男: BASIC による物理—物理ドライラボ—(共立, 1983).
- (5) 東海大学出版会: 物理学実験〈テーマ編〉(1982) pp.79-88.
- (6) 霜田光一, 桜井 海: エレクトロニクスの基礎, (裳華房, 1984)p.217. $\tau = Q/2\omega_0$ と記されている。

Use of Computer for a Study of Electric Circuits

Yasuko NISHIYAMA* and Shinya MIHARA**

ABSTRACT

A computer program to study the effects of resistors, capacitors, and inductors in electric circuits and related transient phenomena was made by using a language of BASIC on MS-DOS operating system. The program contains three experiments, capacitor charging and discharging in RC series circuits, damped oscillations in RLC series circuits, and half-wave rectification by using a diode. And it enables by simple operation one to select of an experiment, to get data, to convert it into digital data and to display it on a monitor. The experiments using this program have the following advantages on comparing with those using an ordinary oscilloscope without a storage device; Those are able to use simpler circuits with batteries, to compare two wave forms or more and the corresponding circuits, to simulate transient phenomena, to decide parameters in the circuits and so on. Using this program, we made an experiment of damped oscillations, and discussed the relation of a damped oscillation and a quality factor, and damping factors for condensers differ in type.

* Division of Science : Department of Physics

** Present address : Kanzan Junior High School, Shizuoka, Shizuoka