

## 教育用実験のための正弦発振合成器の製作

直江俊一, 馬替敏治, 石橋久伸

Construction of the Sinewave Synthesizer  
in the Physical Experiments for the  
Junior Course.

Shun-ichi Naoe, Toshiharu Magai, Hisanobu Ishibashi.

### ABSTRACT

A synthesizer has been developed in order to demonstrate the superposition of harmonic oscillations on electric circuit. The five kinds of oscillations with arbitrary phase and arbitrary frequency are superposed by making use of IC 8038. The Wien bridge generator has more high quality in wave form and is used to draw Lissajous's figure. The synchronous circuits for the both cases are reported.

### 緒 言

振動および波動現象は物理学で重要な位置を占め、学習段階が進むにつれて、その傾向は顕著になる。教養課程では振動や波動の課題は専門課程へのつなぎ程度の扱いとなりやすいのは残念なことである。本格的に取り入れると数学的に高度になる等の理由もあると思われるが、物理学にとどまらず自然科学の諸分野にも広くそれらの概念が必要となってきた現状では、もっと意識的に振動、波動現象を課題として設定すべきではなからうか。

本実験装置は、任意の周波数、位相、振幅の単振動を電気回路上ではあるが、その合成をし、オシロスコープにより観察をしようとするものである。直線上の単振動の合成、垂直な方向の単振動の合成(リサージュ図形)、フーリエ合成への発展などの課題は標準的なものである。さらに本装置はアンプ・スピーカブロックも付加しており、合成信号を音として聞く、いわゆるシンセサイザーの役割も果たすことができる。

## 設 計 方 針

上記の課題を達成する上での、回路技術上の中心は、多数の発振器の同期発振をいかに実現するかということにつきる。この点について、任意の周波数や位相の正弦発振の合成ということになると、現在、確立した方法は必ずしもないようである。これは本報告の中心的課題となった。発振器本体としては、シンセサイザーとしての利用も考えて、発振周波数を外部からコントロールできる、VCOタイプのICである、インターシル社の8038を用いることにした。幸い8038を用いた発振回路例は教科書にも採用され<sup>1)</sup>、キットとしても発売されているので<sup>2)</sup>、それを利用することにした。IC 8038の正弦発振は、三角波から、ダイオードによる折れ線近似によって作られるものであり、波形に折れ曲がりがある。このためリサージュ図形に利用することは適切ではない。リサージュ用に別にウイーンブリッジによる発振器を付け加えることにした<sup>3)</sup>。

正弦発振を任意の位相で取り出すためには、移相回路を通さなければならない。位相の可変範囲を広くとるためにはそれなりの回路上の工夫が必要である。ここでは極性切り換えにより位相を $180^\circ$ 大きく変え、それぞれの極性において、可変抵抗器の調節により $100^\circ \sim 150^\circ$ は変えうる移相回路を用いた<sup>4)</sup>。

電気信号の合成はミキサー回路で行った。電気振動を音として聞くためIC LM308Mを用いたオーディオアンプ<sup>5)</sup>およびスピーカー内蔵ブロックを付加した。

以上の各ブロックは、8038による発振器5個、同期信号用発振器、同期回路、ウイーンブリッジ発振器2個、移相器5個、ミキサー、アンプ・スピーカブロックの総計16個にもなるので、同一規格のコンパクトなシャーシに組み込み、電源供給ラインにプラグイン方式で配置するこ

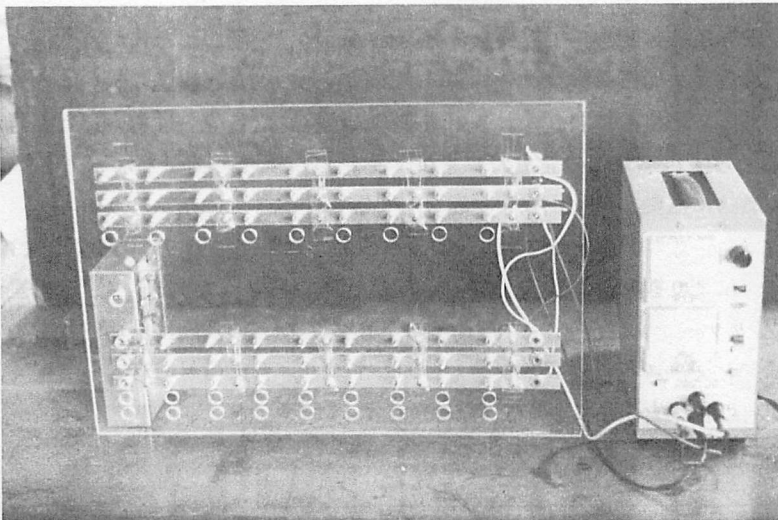


写真1 電源供給パネル。16個の回路ブロックに電源を供給すると同時にブロック保持の役割も果している。

とした。電源は±12Vである。各ブロックの電気信号を、随時、オシロスコープで観察できるように、各ブロックにはモニター用ターミナルをできるだけ設けた。

### 同期回路

#### 1. IC 8038 の同期回路

IC 8038 ではタイミングコンデンサーへの充放電をくり返して矩形波を発生することを基本とし、それを波形整形して三角波さらには正弦波を送り出している。従って同期発振のためには、コンデンサーの充放電の位相をそろえることが必要である。先ず最初に図1のように二つ

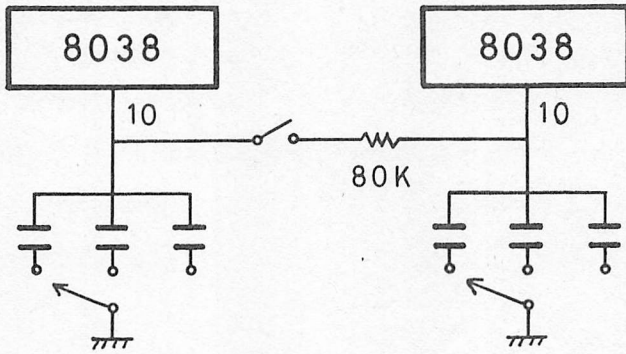


図1 発振器の単純な結合。タイミングコンデンサーはIC 8038の10番ピンに付けられる。抵抗を介して結合する。回路の他の部分はすべて省略してある。

写真 a

写真 b

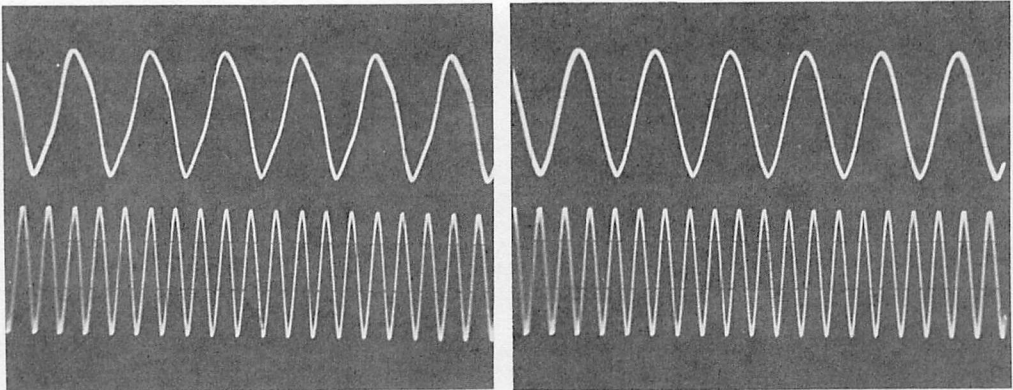
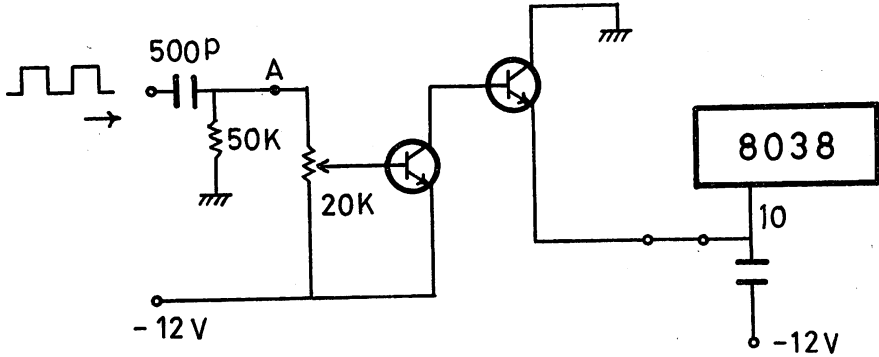


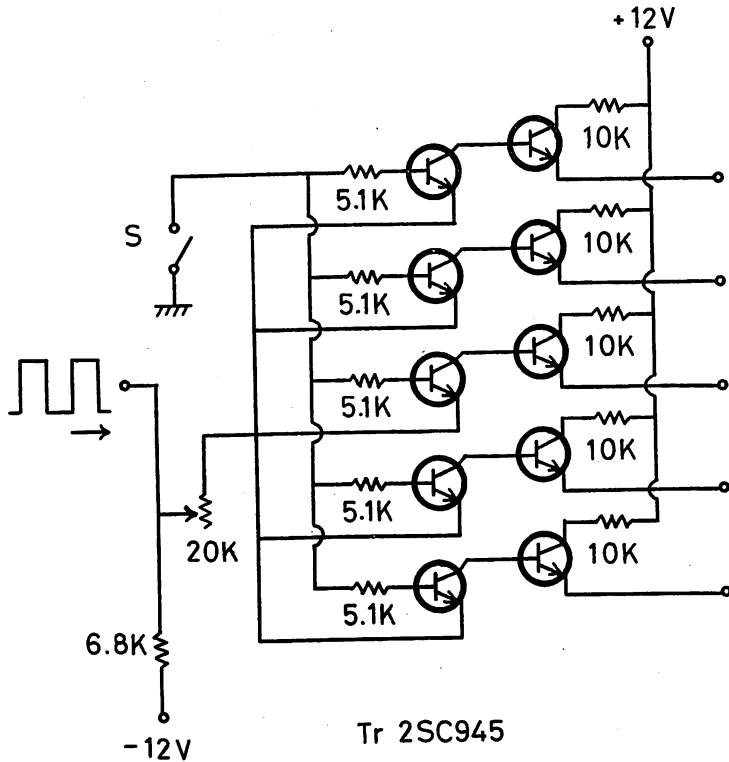
写真2 発振器の連成振動。写真 a は図1のスイッチを入れ結合させた場合。写真 b は結合を切った場合を示す。後者のために VERT MODE の可能な二現象オシロスコープ（横河北辰電機，MODEL 3666）を用いた。

の発振器ブロックを接続する。発振器が連成振動を起し写真2のようになった。従って各発振器はできるだけ独立にして、かつ同時にコンデンサーのショートからの解放を行なわなければならない。この目的にそう回路として図2のような回路を作成した。図2のA点に同期パルス



Tr 2SC945

図2 パルスによる同期回路。



Tr 2SC945

図3 8038のための同期回路。5個の発振器の同期をとる。

を加えトランジスタスイッチを作動させる。この方法では確かに各発振器の結合はまぬがれたが、各発振器の周波数が特定のもののみ良く同期がかかるという結果になった。これは発振周波数も位相も様々の各発振器のコンデンサーの荷電状態が緩和するには、同期パルスの継続時間が短かすぎるものと考えられた。従って、コンデンサーショートの間を充分にとることが必要であり、結局、同期信号として矩形波をそのままかけ、周期の $\frac{1}{2}$ のみ各発振器を発振さ

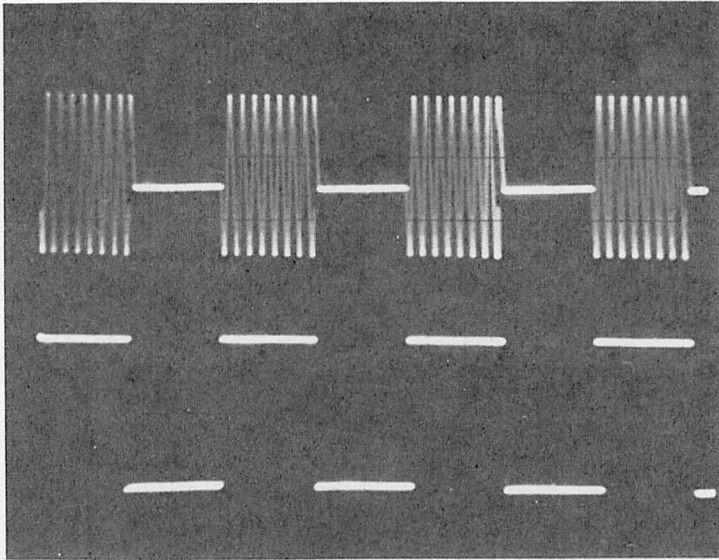


写真3 同期したバースト発振。上が得られたバースト発振。下が同期の矩形波。

せるという、いわゆるバースト発振の形式をとることにした。図3の同期回路によって写真3の結果を得た。VR 20 K $\Omega$ を調整してスイッチングの適正域を決める。スイッチSを切ると各発振器は独立に発振する。

## 2. ウィーンブリッジ発振器の同期回路

図4に示すように同期回路の端子がある。この端子を直結すると、前例と同様に連成振動となってしまう。従って、発振器間の結合を充分小さくし、かつ微量の電荷を共振的に移動させることが必要である。もちろんこの場合、同期は任意の周波数ではとれない。この要請に合致する回路として図5に示すように、N型FETである2SK15を用い、可変抵抗によってゲートに負のバイアスをかけ、可変抵抗の調整によって発振器間の結合度を変えるものである。写真4に示すように、FETを使用することによって、発振器間の結合度を位相によって異ならせるという微妙な調整能力が実現した。

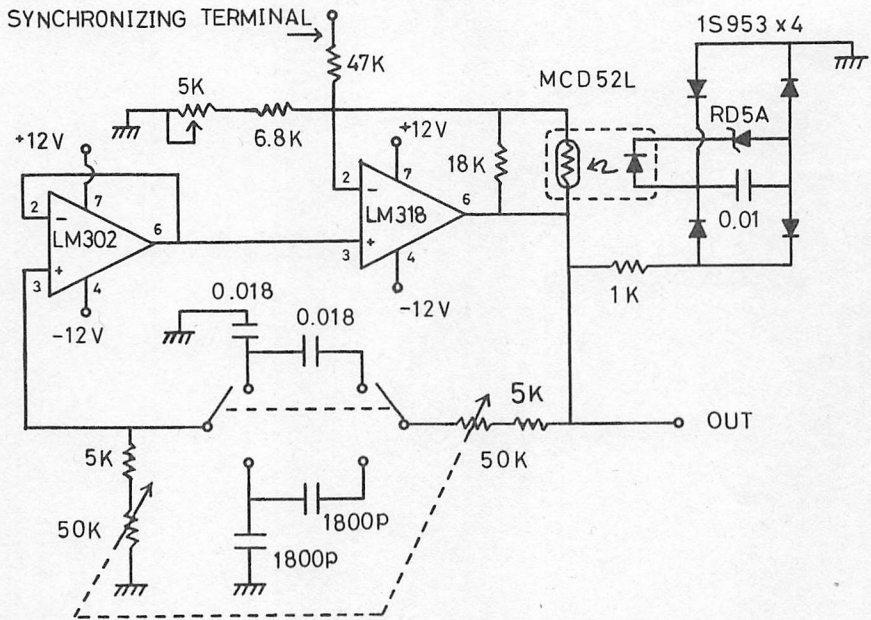


図4 ウィーンブリッジ発振器。横井与次郎氏による。可変抵抗により周波数を調整するなどの若干の変更をしている。

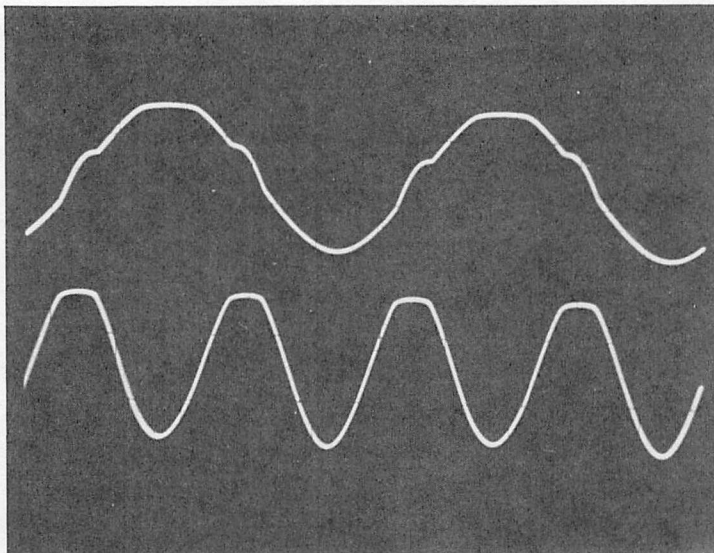


写真4 位相に敏感な結合。図5のA点とB点の信号を示す。振動数が2倍異なる正弦発振の結合。

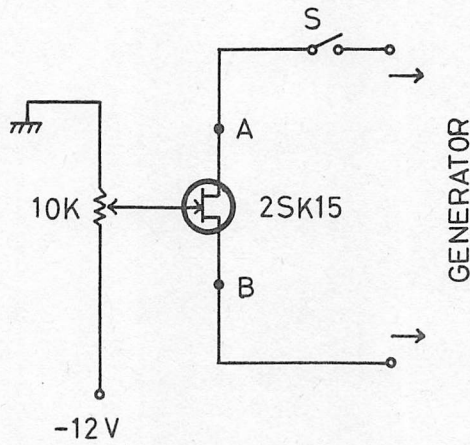


図5 FETによる同期回路。VR10KΩの調整により二つの発振器の結合度を変えることができる。

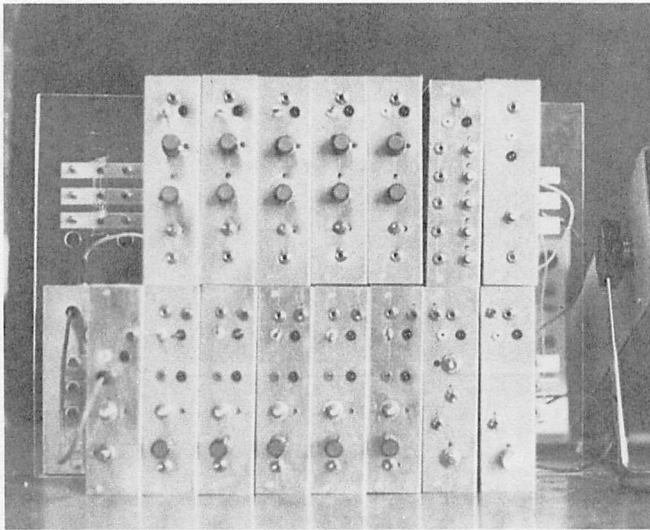


写真5 正弦発振合成器。

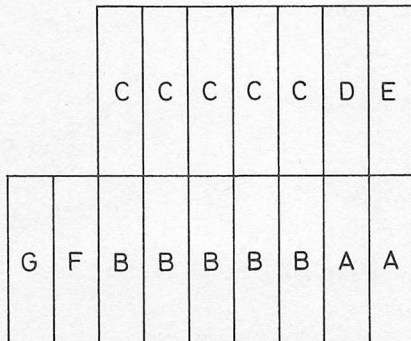


図6 ブロック配置図。

- A ; ウィーンブリッジ発振器
- B ; IC 8038 による発振器
- C ; 移相器
- D ; ミキサー
- E ; アンプ・スピーカーブロック
- F ; IC 8038 のための同期発振器
- G ; IC 8038 の同期回路

## 結 果

装置の全景を写真5に、その説明を図6に示す。

ウィーンブリッジ発振器およびその同期回路、移相器、ミキサーの性能を総合的に示すために、同じ周波数で振幅と位相の異なる二つの正弦発振の合成の結果を示す。良く知られているように、次の関係式が成立する。

$$\begin{cases} x_1 = A \sin \omega t, & x_2 = B \sin(\omega t + \phi) \\ x = x_1 + x_2 = C \sin(\omega t + \varepsilon) \end{cases}$$

とすると

$$\begin{cases} C^2 = A^2 + B^2 + 2AB \cos \phi \\ \tan \varepsilon = \frac{B \sin \phi}{A + B \cos \phi} \end{cases}$$

$x_1$ をX軸方向にとり、位相角 $\phi$ をX軸からの傾きと考えると2次元的表現ができる。このとき振動 $x$ は $x_1, x_2$ をベクトルと考えて、平行四辺形をつくって合成される。図7のように座標軸X,

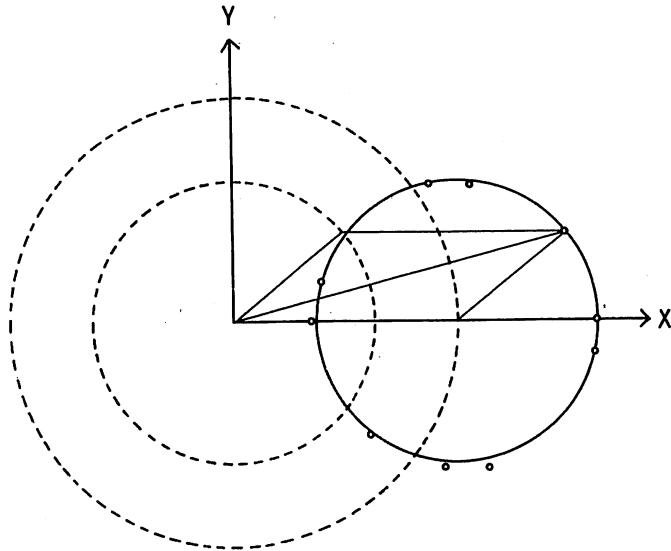


図7 振幅、位相の異なる二つの正弦発振の合成。  
実線は理論、○印は観測値である。

Yをとると合成振動 $x$ は

$$\begin{cases} X = A + B \cos \phi \\ Y = B \sin \phi \end{cases}$$

これより



$$(X-A)^2 + Y^2 = B^2$$

の関係を満たすことがわかる。図中の○印が観測結果である。オシロスコープ上での観測のため、位相角については誤差が大きくなるのは止むを得ない。振巾の誤差は1~2%程度である。誤差の原因として移相器で位相を変えると振巾も少し変化する(部品定数の誤差によると考えられる)ことが挙げられる。

リサーチ図形は両者の振動数が整数の比をなすならば原理的には可能であるが、発振器の精度、安定性、オシロスコープの性能(ブラウン管の分解能)等により限定される。本装置では1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7および2:3, 2:5, 3:4,

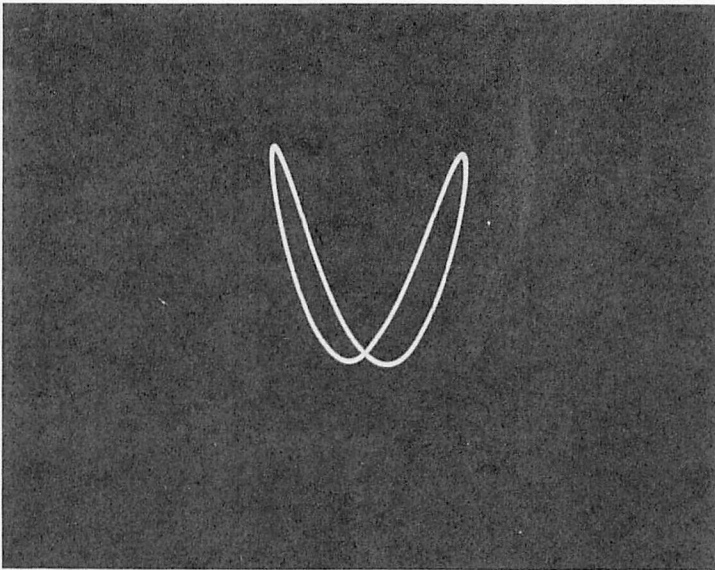


写真6 リサーチ図形。振動数比が1:2の場合。

3:7, 4:5等の周波数比でリサーチ図形を観測した。写真6に周波数比1:2の結果を示す。

フーリエ合成の重要性は言うまでもない。本装置のように5種類の発振周波数の正弦波の重ね合わせでは、得られるパターンは完全なものとはかなりの隔たりがある。しかし、基本的な振動がどのように組合わされてゆくかを体験することは十分に教育的価値があると思われる。ここでは二つの例を示す<sup>6)</sup>。

① のこぎり波

$$\begin{aligned}
 f(t) &= 2C \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{m} \sin \frac{2m\pi}{T_0} t \\
 &= 2C \left\{ \sin \frac{2\pi}{T_0} t - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{T_0/2} t + \frac{1}{3} \sin \frac{2\pi}{T_0/3} t - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{T_0/4} t \dots \right\}
 \end{aligned}$$

写真 a

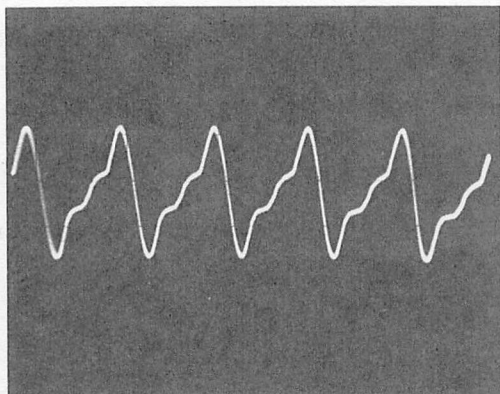


写真 b

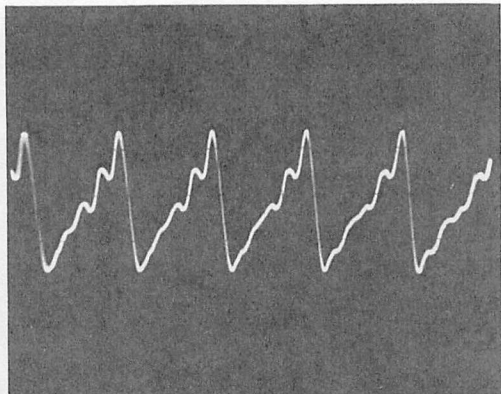


写真7 フーリエ合成。のこぎり波の場合。写真aは3個まで、写真bは5個までの正弦発振の合成。

写真7は同期周波数50Hz,  $T_0$ は $10^{-3}$ 秒の場合を示す。写真aはmが1から3までの合成結果, 写真bはmが1から5までの合成結果を示す。

## ② 矩形波

$$f(t) = \frac{4c}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin \frac{2(2m+1)}{T_0} \pi t$$

$$= \frac{4C}{\pi} \left\{ \sin \frac{2\pi}{T_0} t + \frac{1}{3} \sin \frac{2\pi}{T_0/3} t + \frac{1}{5} \sin \frac{2\pi}{T_0/5} t + \frac{1}{7} \sin \frac{2\pi}{T_0/7} t + \dots \right\}$$

写真 a

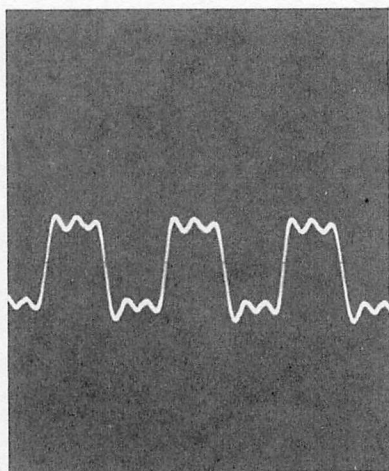


写真 b

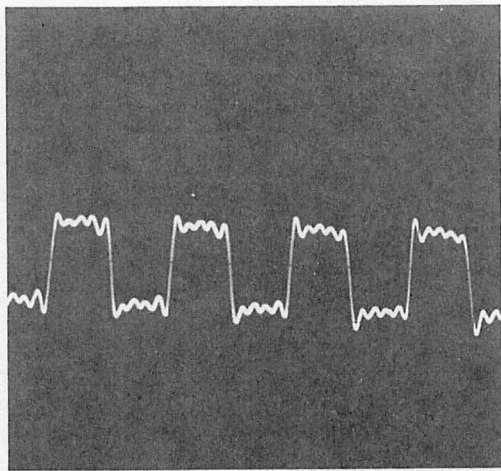


写真8 フーリエ合成。矩形波の場合。写真aは3個まで、写真bは5個までの正弦発振の合成。

写真8は同期周波数50Hz,  $T_0$ は $10^{-3}$ 秒の場合を示す。写真aはmが1から3までの合成結果, 写真bはmが1から5までの合成結果を示す。

IC 8038 の正弦波の波形は必ずしも良くないこと, 周波数や移相器の調整を全体として完全

にすることはオシロスコープを見ながらの操作と言うこともあり困難であること、また発振周波数や同期の安定性も限界があること、これらにより写真に示す以上の精度を実現することはむずかしいと思われる。

以上の報告によって本装置の本来の目的の半分は達せられた。フーリエ合成に関しては項数を多くとることが必要であるが、これはマイコンによるシュミレーションで代えたいと考えている。またいわゆるシンセサイザーとしてはマイコンとのインターフェイスを開発して、音響的側面も強化したいと考えている。これらは次の機会に報告したい。

## 謝 辞

本装置の製作に関して様々のアドバイスをいただいた金沢大学理学部物理教室の小川莞爾氏に深く感謝の意を表明します。また多量の回路ブロックの製作に参加していただいた教養部ゼミナール物理学課題実験の受講生である佐々木祐君および岡田浩二君にも感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 金子俊明：「実用電子回路ハンドブック」No.5 (CQ出版, 1981) 381。
- 2) 秋月電子通商：「8038CC 使用精密波形キット」
- 3) 横井与次郎：「リニア IC 実用回路マニュアル」(ラジオ技術社, 1975) 246。
- 4) トランジスター技術編集部編：「実用電子回路ハンドブック」No.3 (QC出版, 1978) 383。
- 5) 嘉穂無線：「2.5W パワーアンプ AP-452」
- 6) 森口繁一, 宇田川銚久, 一松 信：「数学公式」II (岩波書店, 1957) 240。