

シンクロを用いた物理教育実験

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 出口, 八郎, 泉, 長秀, 山本, 弥一郎 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/23570

シンクロを用いた物理教育実験

出口 八 郎・泉 長 秀・山本弥一郎

日進月歩の現代社会では、視聴覚教育、放送教育、コンピューターによる教育など、新しい大型機械を用い、十分な教育効果をあげる工夫が急速に発達している。これまで、多くの教師が行なってきた授業形態——教室で先生が講義し、学生がその内容を筆記するのに追われる——から一歩進め、それぞれのもつ機械器具の長所を生かし、時には多勢の学生に対し、その場で原理や法則などを理解させる授業形態が活発になっている。シンクロを用いた物理教育実験も、このような観点から、これまで当教室で、授業や学生実験、あるいは現職教育で行なってきたものなどをまとめたものである。いわば、シンクロを用いて、教育効果をあげるための物理教材研究である。

I 教育用としてのシンクロスコープ

もともとシンクロスコープは、電気的な波形の観測用としてつくられたものである。そのため、波動に関係したものはシンクロで再現し、具体的な説明が容易である。周期的に変化する波は勿論、非周期的な波や単発現象の波も観測することができる。電気的な波でなくても、電圧の変化に変換できるものならば、どんな物理量の変化でも観測することができる。

シンクロを教育用として用いる場合、その長所を生かすことができれば、教育効果を高められるが、使用法が適当でないと、いたずらに時間を空費するなどして、効果をあげることができない。まず、教育的見地から、その長所と短所について考えよう。

長所としては、

- (1) 放送教育に用いる T.V. と同じように、螢光膜上の曲線（波形）を、同時に多くの人に見せることができる。特に周期的な波形の観測や測定に適当である。
- (2) 各要素、例えば抵抗や電流の値を変化することにより、曲線がどのように変化するかを観測し、その場で物理的意味を考えさせることができる。

短所としては、

- (3) 長時間におよぶ物理量の変化や、極めて短い時間に起る変化（周波数の極端に高い波形）の観測は適当でない。このような場合には他の機器を用いなければならない。例えば、長時間におよぶときは X-Y レコーダーを、極めて短いときは、サンプリングスコープなどの高価なものでないと観測できない。

- (4) 取扱については、ある程度の電子工学的な知識を要する。つまみなどが数多くあり、操作が複雑にみえるが、ある程度熟練すれば便利な教育用具といえる。

シンクロスコープを教育用として用いる場合、一般の教育用具と同じように、次の点に注意しなければならない。

- (イ) 研究用の高価なものでなく、ありふれた通常のシンクロを用いてできる教材であること。
- (ロ) 誰でも容易に再現できる教材であること。
- (ハ) 基礎的な法則や原理などに関係した教材であること。

II シンクロスコープの応用原理

シンクロスコープの構造や取扱に関しては、数多くの入門書や専門書があり、また、各機種

にはそれぞれ取扱説明書があって詳述されている。ここでは、応用する者の立場から、その原理について考えよう。

ブラウン管の電子銃で発射された電子の流れは、電子レンズで集束され、蛍光膜上に1つの輝点を生ずる。その途中に、静電形ブラウン管では水平、垂直2つの偏向板があり、また、電磁形ブラウン管では水平、垂直2つの偏向コイルがあり、それらに加える電圧によって電子の流れの方向をかえることができる。即ち、輝点を移動させグラフを表現することができる。この場合、水平偏向板はグラフの横軸に、垂直偏向板は縦軸に相当する。

そこでこれら2つの偏向板（または偏向コイル）に、どのような電圧を加えるかにより、応用できる範囲が定まってくる。通常、水平偏向板に加える電圧は次の4通りである。

- (1) 外部から適当な電圧（主として正弦波）を加える。——外部掃引
- (2) 一定周期の鋸歯状波電圧が加えられる。——内部自励掃引
- (3) ある大きさの信号を受けたとき、または、外部からトリガーを与えたとき、鋸歯状波電圧が加えられる。——トリガー掃引
- (4) 特殊な電圧を加える。

以上の4通りのいずれの場合でも、電子銃に輝度変調を加えることにより、タイムマークを入れることができる。次に、垂直偏向板に加える電圧は、各種の信号波（電圧）で、電圧に変換できるものでありさえすれば、どんな物理量（または要素）であってもよい。さらに二現象シンクロスコープでは、同時に二つの現象（信号波）を観測することが可能である。

さて、水平偏向板に加える4種類の電圧と、垂直偏向板に加える電圧との組み合わせにより、次のような利用法が考えられる。

- (1) 水平偏向板には外部から正弦波電圧を加え、垂直偏向板には適当な電圧を加える。
 - 1) リサージュの図形
 - 2) 放物線運動

- 3) 磁気履歴曲線
- 4) 非オーム抵抗
- (2) 水平偏向板には一定周期の鋸歯状波電圧を加え、垂直偏向板には適当な電圧を加える。
 - 5) 基礎的な波形
 - 6) 振動数が一定な音の波形
 - 7) 交流波形
 - 8) 波の合成
 - 9) 波の反射
- (3) ある大きさの信号をうけたとき、または外部からトリガーを与えたとき、水平偏向板には鋸歯状波電圧を加え、垂直偏向板には適当な電圧を加える。
 - 10) 減衰振動
 - 11) 自己誘導
 - 12) 相互誘導
- (4) 水平偏向板には特殊な電圧を加え、垂直偏向板には適当な電圧を加える。
 - 13) 水の波

III 具 体 例

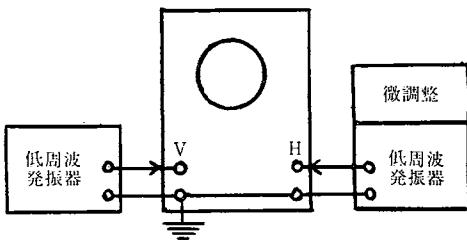
いくつかの具体例を示すが、いずれも教育用のありふれた機器を用いたものである。即ち、シンクロスコープはSS-5025、低周波発振器はAG-10、その他は、若干のラジオ、テレビ用のパーツを組み合わせ、自作したものばかりである。研究用に使用されるような高価な器具は何一つ使用していない。そのため、波形の一部に歪がみられるものや、中央と周辺で同時にピントがあわないものもあるが、やむを得ないことである。勿論、研究用の高価なシンクロスコープ、メモリスコープ、シグナルジェネレーター、または周波数通倍器などを用いれば、より完全な波形が観測できるであろう。

48枚の写真は、あとの頁にまとめて示すことにする。いずれもSSまたはSSS(ASA100または200)でとったものである。そのうち、写真41~44の4枚は、過渡現象のため、絞り全開、露出はBでとってある。他の44枚はいずれも絞りは全開、露出1/15~1/30秒でとったもの

である。また、48枚のうち9枚は重ねどりをしたものであるが、これらは古い形式のカメラを使用してとったものである。

(1) リサージュの図形

A を振幅、 φ を位相角とすると、横軸には、 $H=A \sin mt$ で表わされる電圧を、縦軸には、 $V=A \sin (nt+\varphi)$ の電圧を加え、水平、垂直2つの波の角周波数 m, n が整数比をなす場合で、第1図のブロック結線で得られる。



第1図 リサージュの図形のブロック結線図

微調整回路とは、共振回路のコンデンサーに、これと並列に微調整用コンデンサーをつけたもので、周波数の微妙な調整をするために用いる。

m と n が簡単な整数比をなすリサージュの図形を写真1～7に示す。

写真1 リサージュの図形 (その1)

$$m:n=1:1$$

$$\varphi=0$$

写真2 リサージュの図形 (その2)

$$m:n=1:1$$

$$\varphi=-\frac{\pi}{4}$$

写真3 リサージュの図形 (その3)

$$m:n=1:1$$

$$\varphi=\frac{\pi}{2}$$

低周波発振器の波形が完全な正弦波でないため、完全な円にならない。

写真4 リサージュの図形 (その4)

$$m:n=2:1$$

$$\varphi=-\frac{\pi}{8}$$

写真5 リサージュの図形 (その5)

$$m:n=1:2$$

$$\varphi=0$$

写真6 リサージュの図形 (その6)

$$m:n=2:3$$

$$\varphi=0$$

写真7 リサージュの図形 (その7)

$$m:n=2:3$$

$$\varphi=-\frac{\pi}{4}$$

(2) 放物線運動

放物線 (または弾道曲線) はリサージュの図形の特別な場合として求められる。即ち、横軸の角周波数 m と縦軸の角周波数 n との比が、 $m:n=1:2$ で、位相角 $\varphi=\frac{\pi}{2}$ の場合である。放物線運動を写真8, 9に示す。

写真8 放物線運動 (その1)

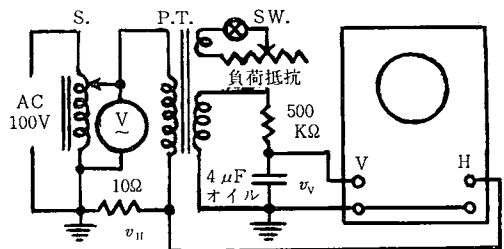
投射角が一定な放物線運動で、初速が異なる3つの曲線の重ねどりである。

写真9 放物線運動 (その2)

初速が一定な放物線運動で、投射角が異なる6つの曲線の重ねどりである。頂点 (最高点) の軌跡は半楕円となる。

(3) 磁気履歴曲線

強磁性体には磁気履歴の現象がある。この現象は、通常、横軸に磁化力 H 、縦軸に磁化の強さ I を用いた磁気履歴曲線で示される。これを第2図の回路により、シンクロで観測することができる。



第2図 磁気履歴曲線測定のための配線図

パワートランス (P.T.) の一次コイルの電流 (瞬時値) を i , 10Ω (ニクロム線) の両端の電圧 (瞬時値) を v_H とすれば, オームの法則により, i は v_H に比例する。また, 磁化力 H は電流 i に比例する。従って v_H は H に比例する。即ち $v_H \propto H$

次に, 二次コイルの電圧 (瞬時値) を e , 磁束を Φ , 磁束密度を B , 断面積を S とすれば,

$$e \propto \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(BS) \propto \frac{dB}{dt}, \text{ 即ち, } e \propto \frac{dB}{dt}$$

積分回路 ($500K\Omega$ と $4\mu F$) で二次電圧を積分すれば, $4\mu F$ の両端の電圧 (瞬時値) v_V は,

$$v_V \propto \int e dt \propto \int dB = B$$

v_H を水平軸に, v_V を垂直軸に入れるから, シンクロスコープの螢光面には, 横軸が H , 縦軸が $B (= \mu_0 H + I)$ の曲線が得られる。通常の $H-I$ 曲線 (磁化力-磁化の強さ) と若干異なるが, 強磁性体では $\mu_0 H$ が I に比して小さく, B と I は大体等しいと考えてよい。このようにして得られたパワートランス (P.T.) の鉄心の磁気履歴曲線 ($H-B$ 曲線) を, 写真10~13に示す。

写真10 磁気履歴曲線 (その1)

負荷抵抗 ∞

入力電圧が 0, 10, 20, 40, 100ボルトの5つの曲線の重ねどりである。

写真11 磁気履歴曲線 (その2)

負荷抵抗 20Ω

入力電圧が 0, 10, 20, 40, 100ボルトの5つの曲線の重ねどりである。

写真12 磁気履歴曲線 (その3)

負荷抵抗 5Ω

入力電圧が 0, 10, 20, 40, 100ボルトの5つの曲線の重ねどりである。

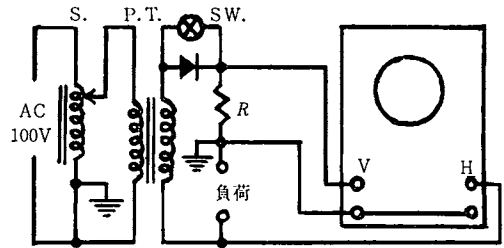
写真13 磁気履歴曲線 (その4)

入力電圧 100ボルト

負荷抵抗が 5, 10, 20, 40, ∞ オームの5つの曲線の重ねどりである。

(4) 非オーム抵抗

金属導体はオームの法則に従い, 電圧と電流は比例関係にある。しかし, 半導体, 真空管, 放電管などでは, 一般に比例関係がなく, それぞれに固有な電圧-電流の特性曲線で示される。この関係を調べるために, 第3図の回路を用いると便利である。



第3図 特性曲線測定の配線図

負荷にはネオンランプ, ダイオードなどを入れる。抵抗 R はニクロム線で, 流れる電流により適当な値を選ぶ。

非オーム抵抗の特性曲線を写真 14~17 に示す。

写真14 ネオンランプの特性曲線 (その1)

100ボルト用のネオンランプに, 交流電圧を加えたときである。

横軸 30V/cm, 縦軸 3 mA/cm

写真15 ネオンランプの特性曲線 (その2)

100ボルト用のネオンランプに, 正方向のみの電圧を加えたときである。

横軸 15V/cm, 縦軸 2 mA/cm

写真16 ダイオード (SE-05) の特性曲線

横軸 20V/cm

写真17 三極真空管の V_P-I_P 特性曲線

真空管は 6J6 の片側を用いる。

横軸 20V/cm, 縦軸 4 mA/cm

上から $V_g = -1, -2, -3, -5, -7$ ボルトの5つの曲線の重ねどりである。

(5) 基礎的な波形

正弦波，長方形波，鋸歯状波，整流波形，微分波形，積分波形を写真18～23に示す。

写真18 正弦波

低周波発振器より得られたものである。

写真19 長方形波

シンクロスコープの較正電圧端子より得られたものである。

写真20 鋸歯状波

オッシロスコープの鋸歯状波発振器（水平軸）より得られたものである。

写真21 整流波形

上段は全波整流，下段は半波整流。
二現象チョップ観測，横軸 3 mS/cm

写真22 長方形波とその微分波形

上段は微分波形，下段は長方形波
二現象交互観測，横軸 3.3mS/cm
微分回路の時定数は 1.0×10^{-4} 秒

写真23 台形波とその積分波形

上段は積分波形，下段は台形波
二現象チョップ観測，横軸 2.5mS/cm
積分回路の時定数は 2.5×10^{-1} 秒

(6) 振動数が一定な音の波形

振動数が一定な音として，数多くの楽器がある。これらの音をテープレコーダーで録音し，再生して，シンクロでその波形を観測することができる。写真24，25に，家庭用オルガンのドの波形を示す。同じオルガンのドの音でも，1オクターブ異なると，その波形が若干変化している。

写真24 オルガンのドの波形（その1）

横軸 8 mS/cm
音程は C'（振動数 259 c/s）

写真25 オルガンのドの波形（その2）

横軸 8 mS/cm
音程は C

(7) 交流波形

a) 実効値

電圧や電流の実効値は，瞬時値の2乗の平均の平方根（r.m.s.）である。数式を用いて表現すれば，

$$V_e = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T e_0^2 \sin^2 \omega t \, dt \right\}^{\frac{1}{2}} = \frac{e_0}{\sqrt{2}}$$

であるが，シンクロを用い，交流2ボルトの場合を表現すると，写真26の通りである。

写真26 交流の実効値

横軸 2.8mS/cm，縦軸 2 V/cm

実曲線：瞬時値

点曲線：瞬時値の2乗

点直線：瞬時値の2乗の平均

実直線：瞬時値の2乗の平均の平方根
以上4つのグラフの重ねどりである。

b) 電流の位相差

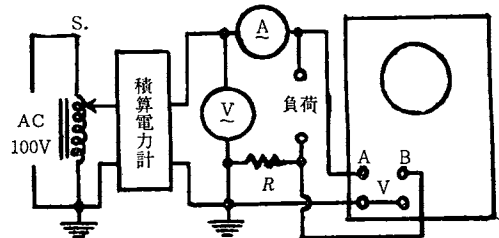
R, C, L が直列に接続された回路に，交流電圧（実効値） V_e を加えると，流れる電流（実効値） I_e は，

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad \text{ただし, } X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

である。この回路の電圧に対する電流の位相差（力率角）を δ とすれば，

$$\tan \delta = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

となり， $\delta > 0$ なら遅れ角， $\delta < 0$ なら進み角



第4図 電流の位相差測定の配線図

抵抗 R はニクロム線で約 1 Ω ，負荷に R, C, または L などを接続する。

とよばれる。この位相差を二現象シンクロスコープを用い、第4図の回路で観測することができる。

測定例を写真27~30に示す。いずれも二現象交互観測で、振幅の大きい方が電圧波形、振幅の小さい方が電流波形である。なお、積算電力計の円形アルミ板の回転速度 (r.p.s.) は、実効電力 $P=V_e I_e \cos \delta$ に比例することが確かめられる。

写真27 電流の位相差 (その1)

負荷: 100V 100W タングステン電球
位相差なし ($\delta=0$)
力率 1

写真28 電流の位相差 (その2)

負荷: 8 μ F オイルコンデンサー
進み角 90° ($\delta=-\frac{\pi}{2}$)

力率 0
古いコンデンサーを使用したため、寄生振動が付加されている。

写真29 電流の位相差 (その3)

負荷: 鉄心付巻数900回のコイル
遅れ角 90° ($\delta=\frac{\pi}{2}$)
力率 0

写真30 電流の位相差 (その4)

負荷: 15W 蛍光灯スタンド
遅れ角約 45° ($\delta=\frac{\pi}{4}$)
力率 約 0.7

c) 蛍光灯の光量

蛍光灯の光を光電管 (P S 50 V) で受け、光電管を流れる電流から、蛍光灯の光量を観測することができる。蛍光灯を流れる電流と、蛍光灯の光量との関係を写真31に示す。

写真31 15W 蛍光灯スタンドの電流と光量

上段は光量の波形、下段は電流波形
二現象チョップ観測

電源の周波数を f c/s とすれば、蛍光灯は、1秒間に $2f$ 回明滅している。また、光量は電流の絶対値に大体比例していることがわかる。

(8) 波の合成

同一直線上を進む二つの波 $x_1=A_1 \cos \omega_1 t$, $x_2=A_2 \cos (\omega_2 t + \varphi)$ を合成すると、一般に複雑な曲線となるが、これをシンクロで直接観測することができる。ここでは、2つの低周波発振器から得られる2つの信号を、混合器で合成し、この合成波を観測する方法をとった。測定例を写真32~34に示す。

写真32 波の合成 (その1)

2つの波の振幅 A_1 , A_2 , および角振動数 ω_1 , ω_2 が極端に異なるときの合成波である。

写真33 波の合成 (その2)

2つの波の振幅 A_1 , A_2 が若干異なり、角振動数 ω_1 , ω_2 も若干異なるときの合成波である。

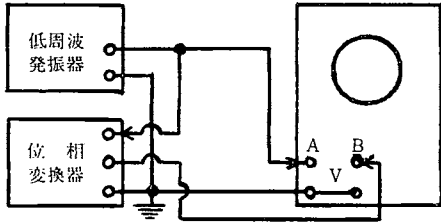
写真34 波の合成 (その3)

2つの波の振幅 A_1 , A_2 が等しく、角振動数 ω_1 , ω_2 が若干異なるときの合成波である。これはうなりとよばれる現象で、群内の波形は変化しないで、この群が1秒間に $n_1 \sim n_2$ 回 (振動数の差) 移動すると考えればよい。

(9) 波の反射

x 軸の正の方向 (右方向) に進む入射波を、 $y_1=A_1 \sin k(x-vt)$, 負の方向に進む反射波を、 $y_2=-A_2 \sin \{k(x+vt) + \varphi\}$ とする。 $x=0$ に固定端があるとき、固定端反射の条件 ($x=0$ のとき $y_1+y_2=0$) を代入すると、 $A_1=A_2$, $\varphi=\pi$ が得られる。即ち、両者の波の振幅は等しく、固定端で位相が π だけ変化して反射する。また、自由端反射の条件 [$x=0$ のとき $\frac{\partial}{\partial x}(y_1+y_2)=0$] を代入すると、 $A_1=A_2$, $\varphi=0$ が得られる。即ち両者の波の振幅は

等しく、自由端で位相が変化しないで反射する。これらの関係を、第5図のブロック結線により、二現象交互観測で求めることができる。



第5図 波の反射のブロック結線図

位相変換器は R, C, L を用いて製作したものである。

測定例を写真 35~40 に示す。いずれの写真も、一方が右方に進む入射波、他方が左方に進む反射波で、右端が固定端、または自由端と考えればよい。

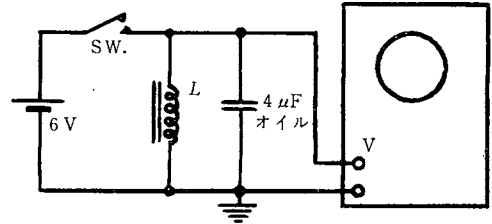
- 写真35 固定端反射 (その1)
- 写真36 固定端反射 (その2)
- 写真37 固定端反射 (その3)
- 写真38 自由端反射 (その1)
- 写真39 自由端反射 (その2)
- 写真40 自由端反射 (その3)

(10) 減衰振動

振幅が時間とともに指数的に減少する単振動で、式では

$$y = Ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi)$$

と表わされる。シンクロでみるときは、通常、 L, C 共振回路の減衰振動を観測する。この回路では、コイルや配線の抵抗のため、ジュール熱が失なわれて減衰振動となる。



第6図 減衰振動測定配線図

L : 鉄心付 900 回巻コイルで内部抵抗は 1.0Ω

第6図の回路で、スイッチを入れてすぐ開くと、写真41のような減衰振動が観測される。

写真41 減衰振動

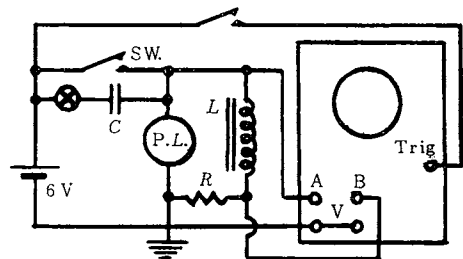
横軸 30mS/cm,

(11) 自己誘導

電源のスイッチを切るとき、接点に火花がとぶことはよく経験することである。これは自己誘導によるもので、発生する誘導起電力 e は、

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

で示される。ただし、 Φ は磁束、 i は電流、 L はインダクタンスである。シンクロによって、この誘導起電力の最大値や電流 i の過渡的な変化を観測することができる。



第7図 自己誘導測定配線図

第7図の回路でスイッチ (Sw) を開くとき、

接点に火花がとび、パイロットランプ (P.L.) は瞬間明るくなる。火花防止用のコンデンサー (C) を入れると、更に強く輝く。ただし、抵抗 R (コイルの内部抵抗を含む) が大きいとき、または、コイルのインダクタンスが小さいときは明るくならない。スイッチを開閉するとき、コイルの両端の電圧と、コイルを流れる電流との関係を、二現象シンクロスコープで観測すれば、写真42, 43が得られる。

写真42 自己誘導 (その1)

接点に火花がとぶ場合 (Cを入れない)
 上段はコイルの両端の電圧
 下段はコイルを流れる電流
 二現象チョップ観測, 横軸 10 mS/cm

写真43 自己誘導 (その2)

接点に火花が殆んどとばない場合
 上段はコイルの両端の電圧
 下段はコイルを流れる電流
 二現象チョップ観測, 横軸 10 mS/cm

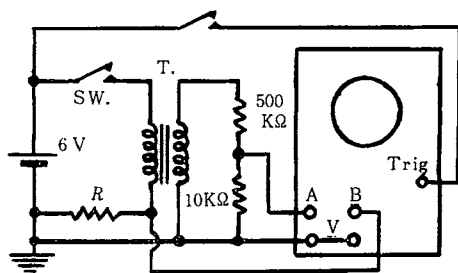
写真42, 43からわかるように、スイッチを入れるとき、コイルの両端の電圧は直ちに6ボルトになる。しかし、コイルを流れる電流は、誘導起電力 (逆起電力) のため、直ちに定常値にならない。またスイッチを切るとき、コイルを流れる電流の変化率が大きいため、至短時間、極めて大きな誘導起電力がみられる。グラフからその最大値を求めると、火花がとぶときは約73ボルト、火花防止用コンデンサーを入れたときは約100ボルトである。

(12) 相互誘導

一次コイルの電流 (瞬時値) を i 、二次コイルの電圧 (瞬時値) を v 、相互インダクタンスを M とすれば、相互誘導は、

$$v = -M \frac{di}{dt}$$

で与えられる。シンクロによって、この一次電流 i と二次電圧 v の過渡的変化を観測することができる。



第8図 相互誘導測定の配線図

抵抗 R は 1Ω のニクロム線

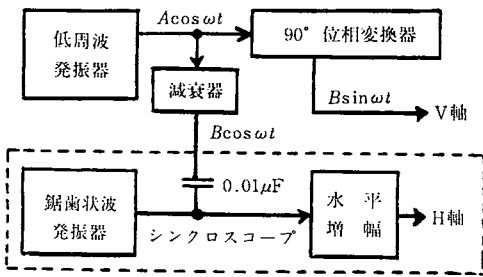
第8図の回路で、スイッチを開閉するとき、トランスの相互誘導により、二次側に高電圧が発生する。この関係を二現象シンクロスコープで観測すると、写真44が得られる。

写真44 相互誘導

上段は二次電圧, 下段は一次電流
 二現象チョップ観測, 横軸 10 mS/cm
 大きな二次電圧が発生するのは、スイッチを入れる時よりも切る瞬間である

(13) 水の波

水の波は、表面張力と重力が原因となって生ずるもので、その形から、さざなみ、表面波、長波の3種類に分類されている。さざなみは表面張力が、表面波と長波は重力が主要な原因となっている。通常、水波楕形としては表面波が用いられている。これは、横波や縦波と異なり、円運動 ($X = A \cos \omega t$, $Y = A \sin \omega t$) の位相が次々に伝播してゆく波である。従って、シンクロスコープの横軸には $H = pt + A \cos \omega t$ 、縦軸には $V = A \sin \omega t$ で表わされる電圧を加えればよい。即ち、横軸には鋸歯状波と余弦波とを合成した電圧を、縦軸には正弦波を加えればよい。この場合のブロック結線図を第9図に示す。



第9図 水波のブロック結線図

90°位相変換器は、インダクタンスが大きく内部抵抗の小さいコイルを主体にしたもので、電圧に対し、90°位相の遅れた波形を得ることができる。また、減衰器は100KΩの可変抵抗器である。鋸歯状波発振器と水平増幅は、シンクロに内蔵しているもので、水平増幅管のグリッドにコンデンサを接続し、鋸歯状波と余弦波を合成する。

このようにして得られた水波模形を写真45～48に示す。

- 写真45 水の波（その1）
表面波（円運動の位相伝播）
- 写真46 水の波（その2）
長波（楕円運動の位相伝播）

- 写真47 水の波（その3）
山が不安定になった波
- 写真48 水の波（その4）
山がくずれおちる波

IV あとがき

13項目の具体例で48枚の写真を示したが、特殊な機器を使用すれば、さらに若干の項目を加えてよいものもある。しかし、一般的でないので省略することにした。

今後、教育用機器がますます発達普及し、その精度が向上するにつれ、さらにいくつかの項目が追加されてゆくであろう。

主な参考図書

1. エレクトロニクスの基礎
霜田光一 裳革房
2. 基礎教育物理学（上，下）
高橋 勲編 共立出版
3. 放送と授業のシステム化
木原，水越，北野編 明治図書
4. 最新教育物理実験
中込八郎編 聖文社
5. 大学実習基礎物理学実験
平田森三，その他4名 裳革房

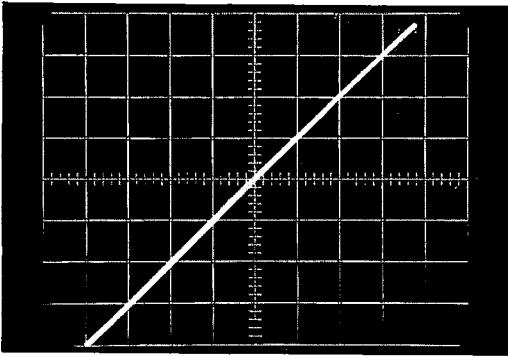


写真1 リサージュの図形(その1)

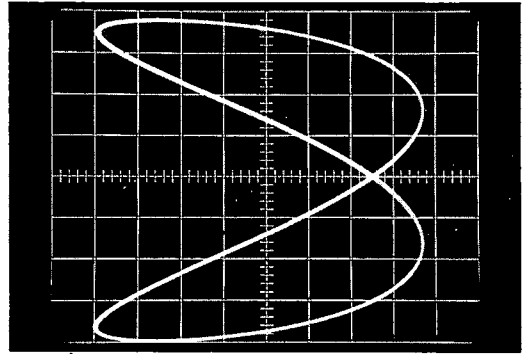


写真4 リサージュの図形(その4)

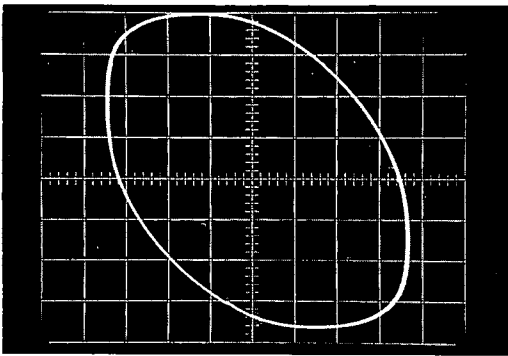


写真2 リサージュの図形(その2)

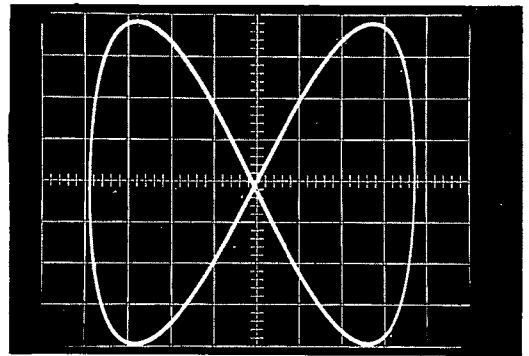


写真5 リサージュの図形(その5)

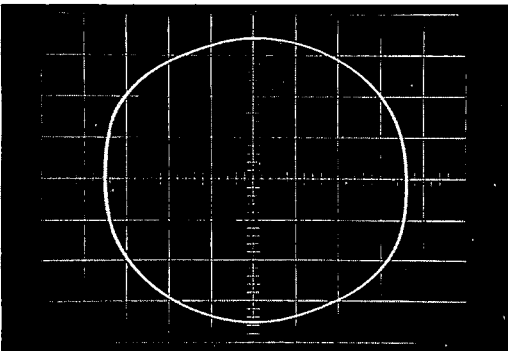


写真3 リサージュの図形(その3)

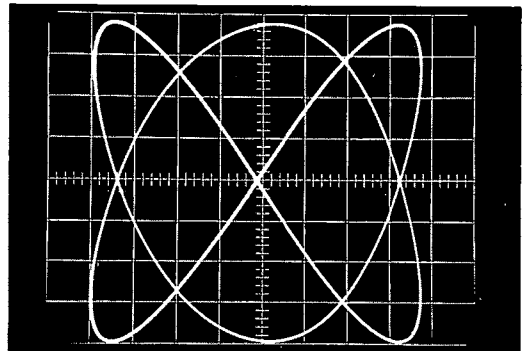


写真6 リサージュの図形(その6)

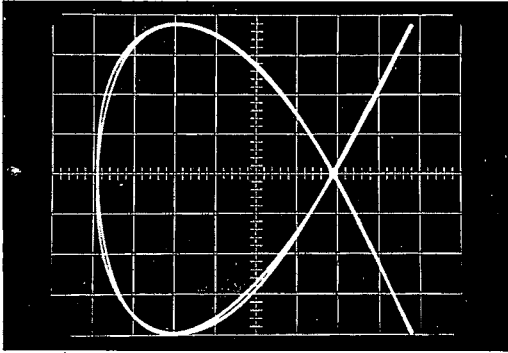


写真7 リサージュの図形(その7)

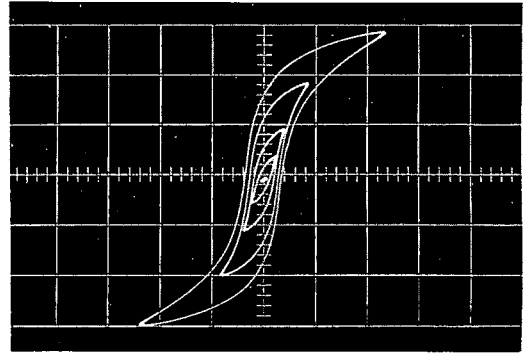


写真10 磁気履歴曲線(その1)

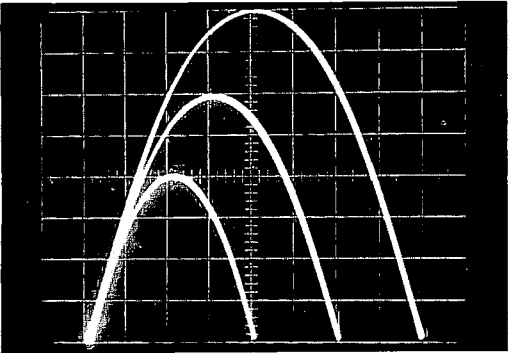


写真8 放物線運動(その1)

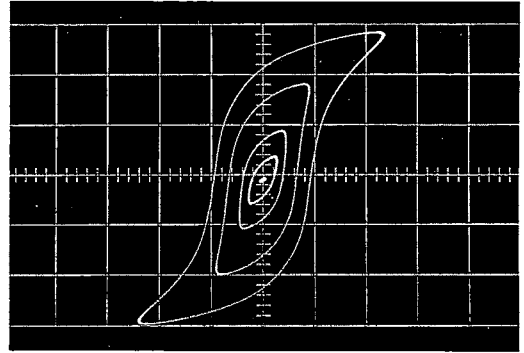


写真11 磁気履歴曲線(その2)

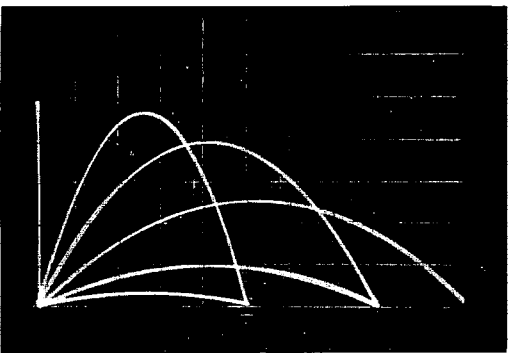


写真9 放物線運動(その2)

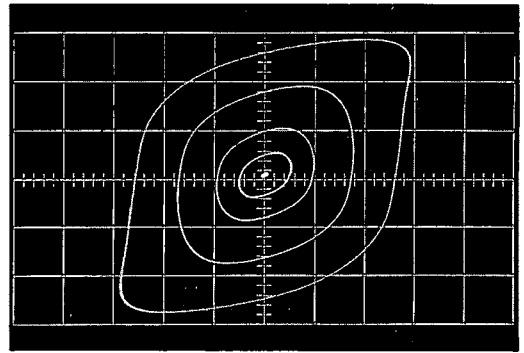


写真12 磁気履歴曲線(その3)

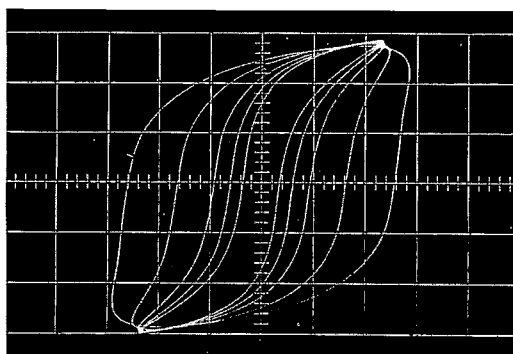


写真13 磁気履歴曲線（その4）

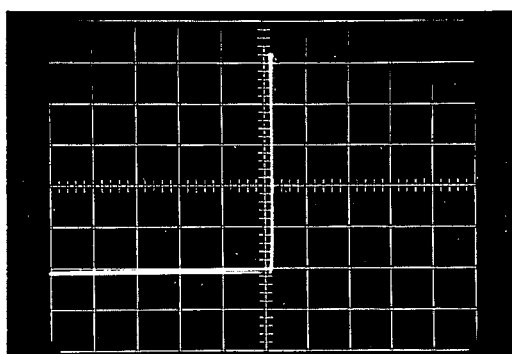


写真16 ダイオード（SE-05）の特性曲線

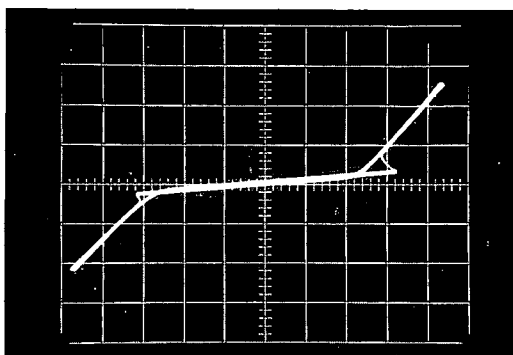


写真14 ネオンランプの特性曲線（その1）

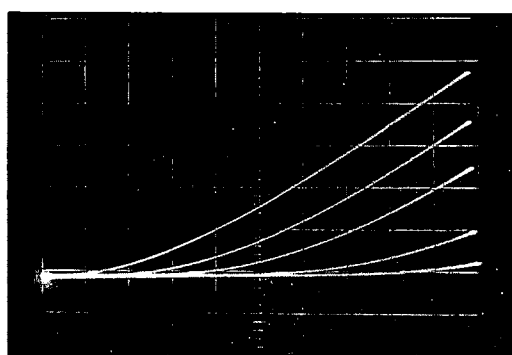


写真17 三極真空管の V_p-I_p 特性曲線

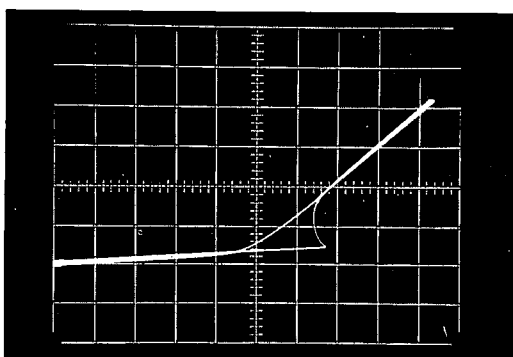


写真15 ネオンランプの特性曲線（その2）

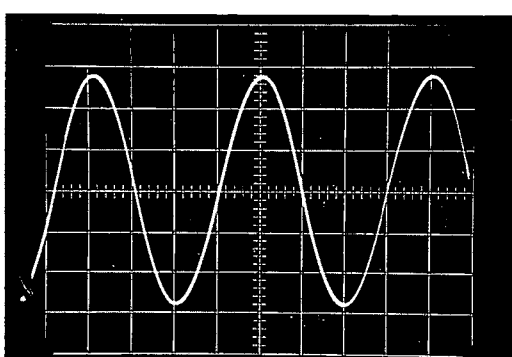


写真18 正弦波

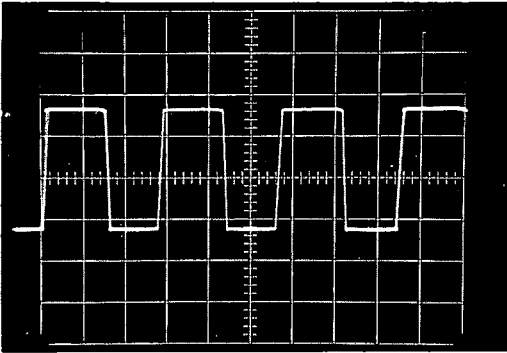


写真19 長 方 形 波

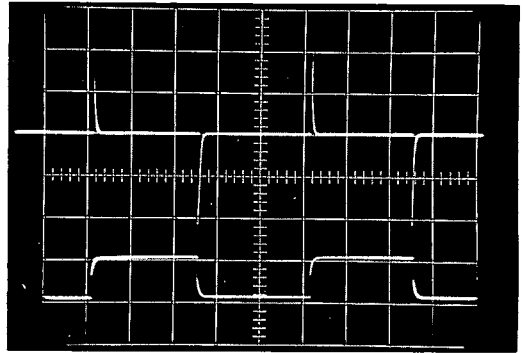


写真22 長方形波とその微分波形

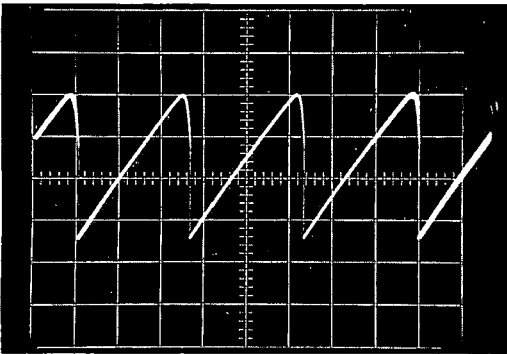


写真20 鋸 歯 状 波

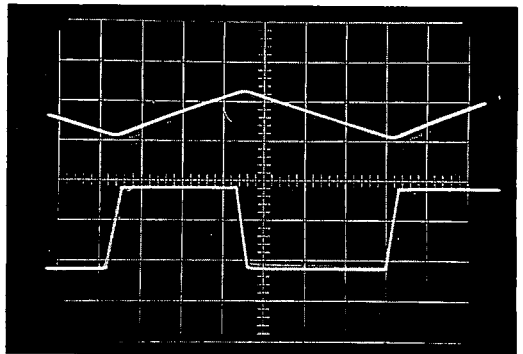


写真23 台形波とその積分波形

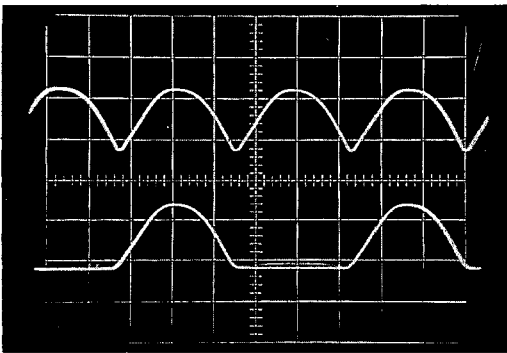


写真21 整 流 波 形

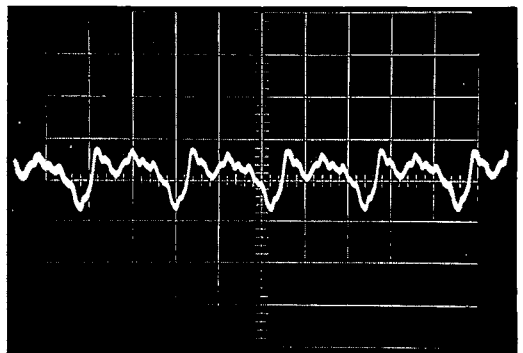


写真24 オルガンの下の波形(その1)

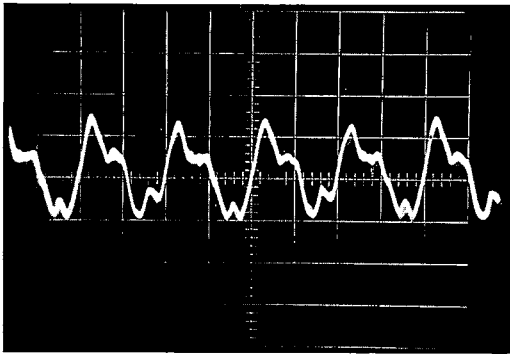


写真25 オルガンのドの波形 (その2)

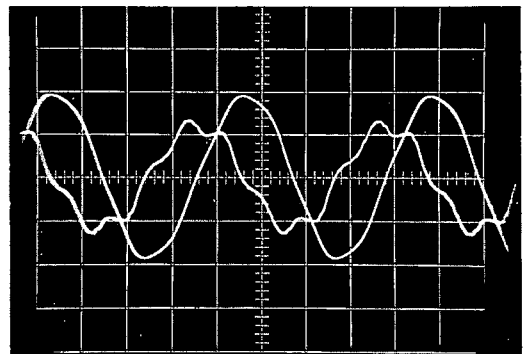


写真28 電流の位相差 (その2)

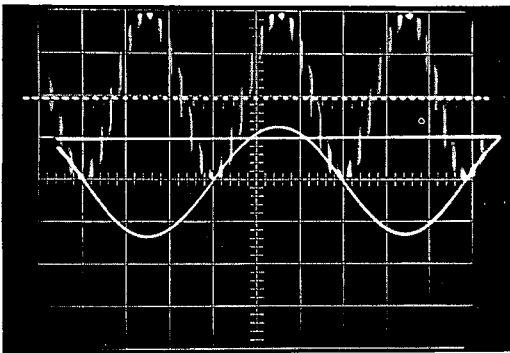


写真26 交流の実効値

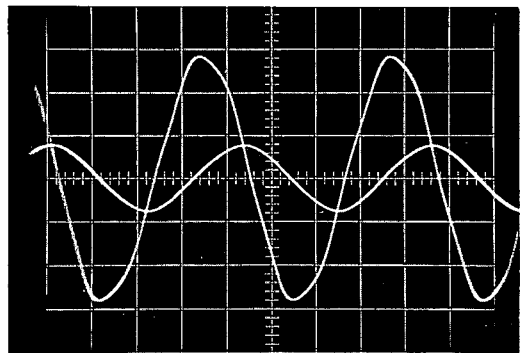


写真29 電流の位相差 (その3)

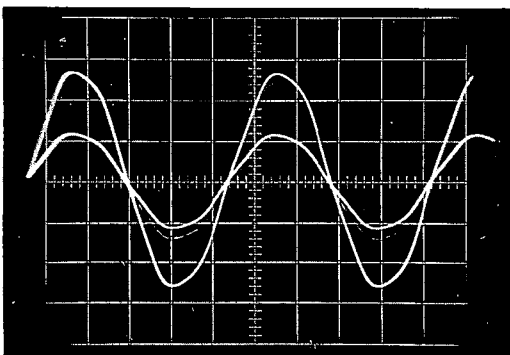


写真27 電流の位相差 (その1)

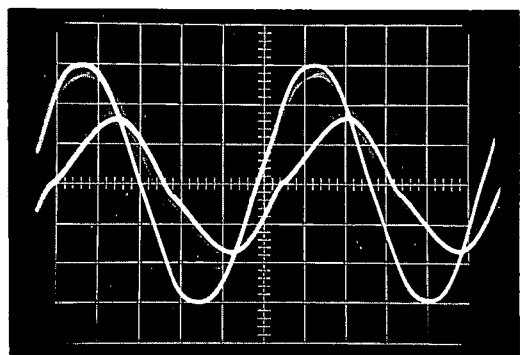


写真30 電流の位相差 (その4)

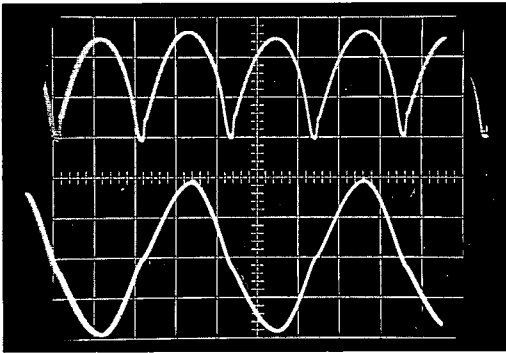


写真31 15W蛍光灯スタンドの電流と光量

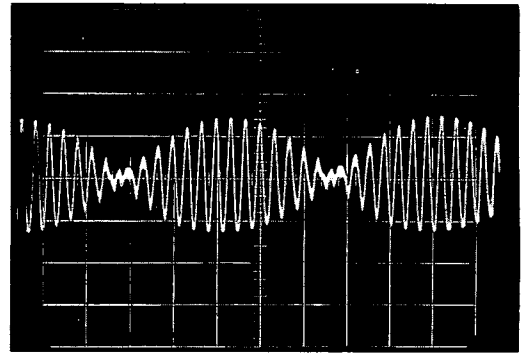


写真34 波の合成 (その3)

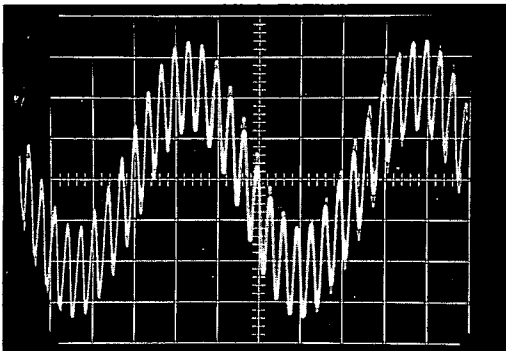


写真32 波の合成 (その1)

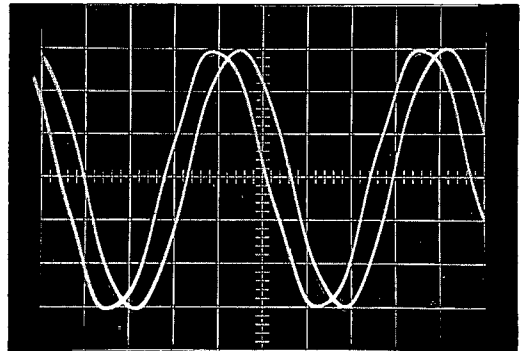


写真35 固定端反射 (その1)

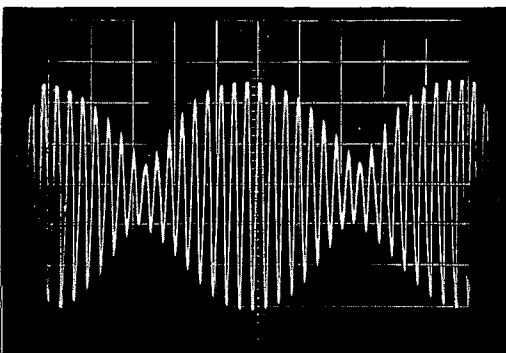


写真33 波の合成 (その2)

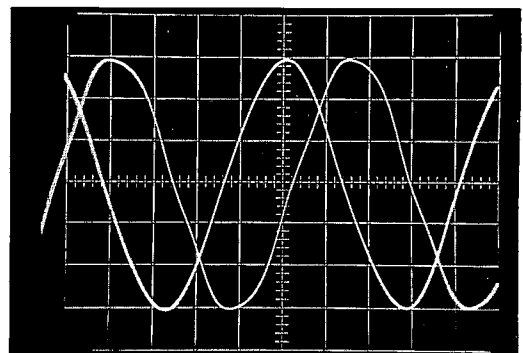


写真36 固定端反射 (その2)

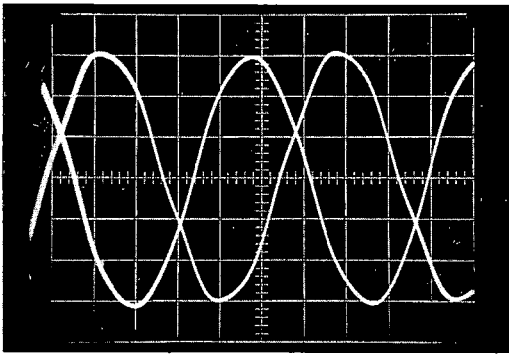


写真 37 固定端反射 (その 3)

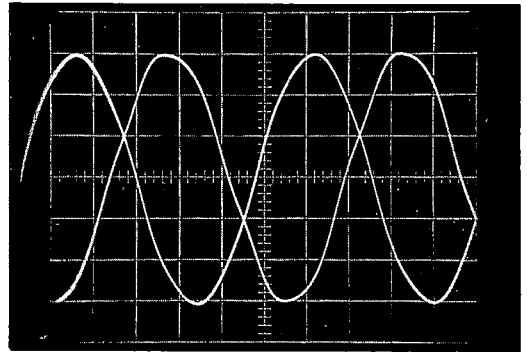


写真 40 自由端反射 (その 3)

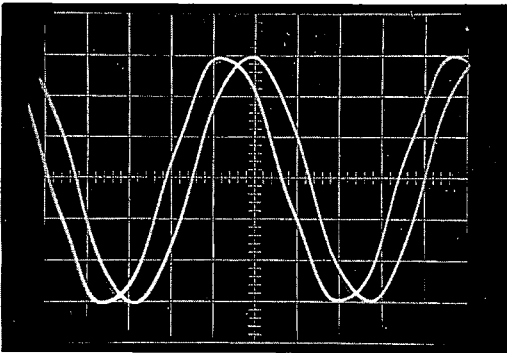


写真 38 自由端反射 (その 1)

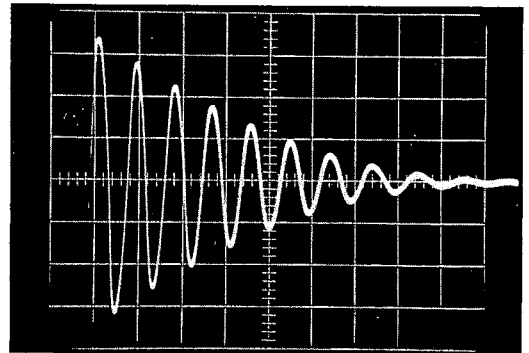


写真 41 減衰振動

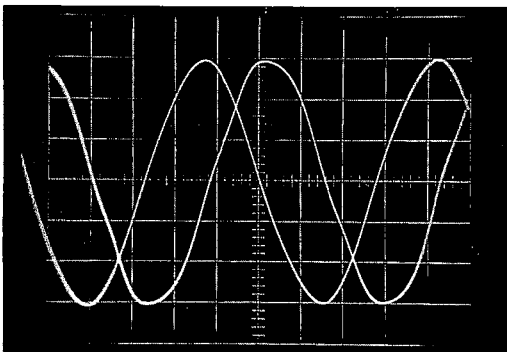


写真 39 自由端反射 (その 2)

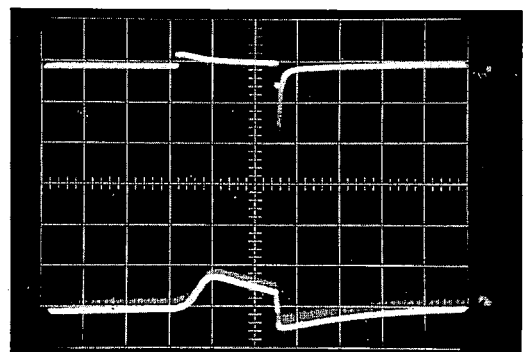


写真 42 自己誘導 (その 1)

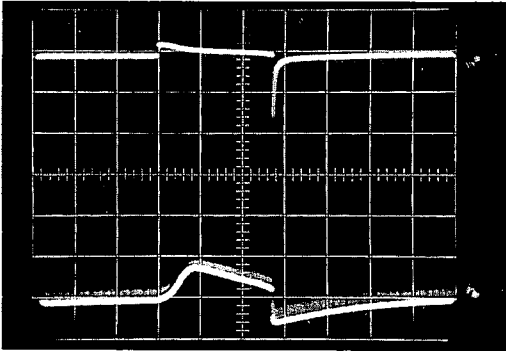


写真 43 自己誘導 (その 2)

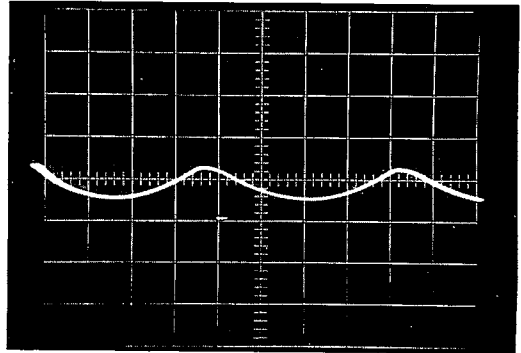


写真 46 水の波 (その 2)

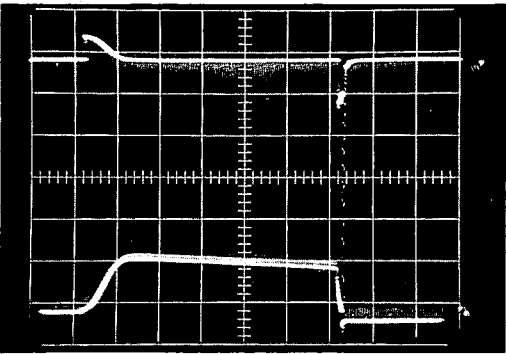


写真 44 相互誘導

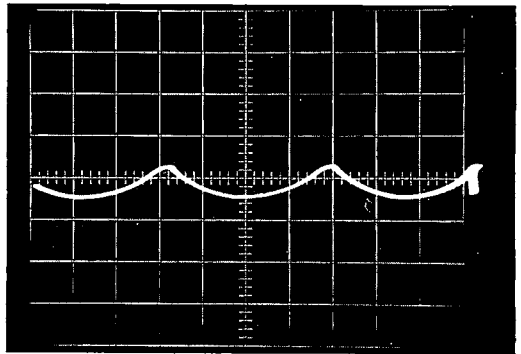


写真 47 水の波 (その 3)

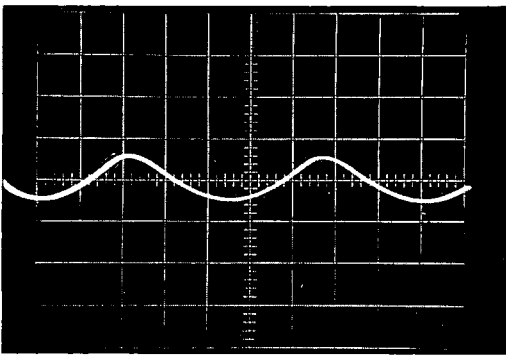


写真 45 水の波 (その 1)

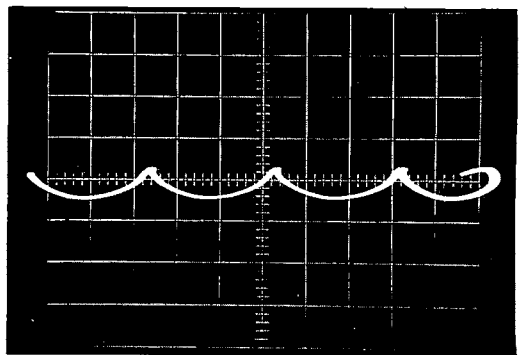


写真 48 水の波 (その 4)