

静電誘導型火花発振器を中心とした 電磁波実験セット

香川県立高松高等学校

教諭

矢野 淳 滋

目的

従来、高校で用いられていた電波実験器は発振の原理が複雑なうえ、電界と磁界を分離して検出することが困難であったため、高校物理の電磁波は極めて抽象的・難解なものとなっていた。本実験セットは上記の難点を克服して、高校生に電磁波を具体的に理解させることを目的としている。

概 要

この実験セットは、発振器、共振器、電界アンテナ、磁界アンテナ、ループアンテナ、環状磁界アンテナ、プリアンプ、反射板、屈折材料からなり、各種アンテナの出力をプリアンプで増幅して直接イヤホンで聞いたり(生徒実験)講義用メーターやオシロスコープに入れ、または更に増幅してスピーカーを鳴らして(教師実験)用いる。

この実験セットを従来のものと比較すると次のような特徴をもつ。

1. 発振器の原理が理解されやすく、ブラックボックスとして取り扱わねばならない部分が存在しない。
2. 電界アンテナと磁界アンテナにより発振器のまわりの電界と磁界の方向および大きさの分布を定性的に観測することが

できる。

3. ループアンテナおよび環状磁界アンテナにより、磁束変化で電界が生じ、電束電流で磁界が生じていることを具体的に理解することができる。
4. 発生する電波は完全な直線偏波で、共振器を用いると1回の放電による波の数を数十個まで増加させることができる。その結果、反射板の前に作った定常波の中で電界と磁界の節を分離して観測することが可能になり、電界、磁界の振動状態を把握させることが容易である。
5. 教室内で進行波の回折、反射、屈折、干渉などを音や光と対応させながら実験することができる。
6. 共振器を電動にして高速度で動かし、遠くの

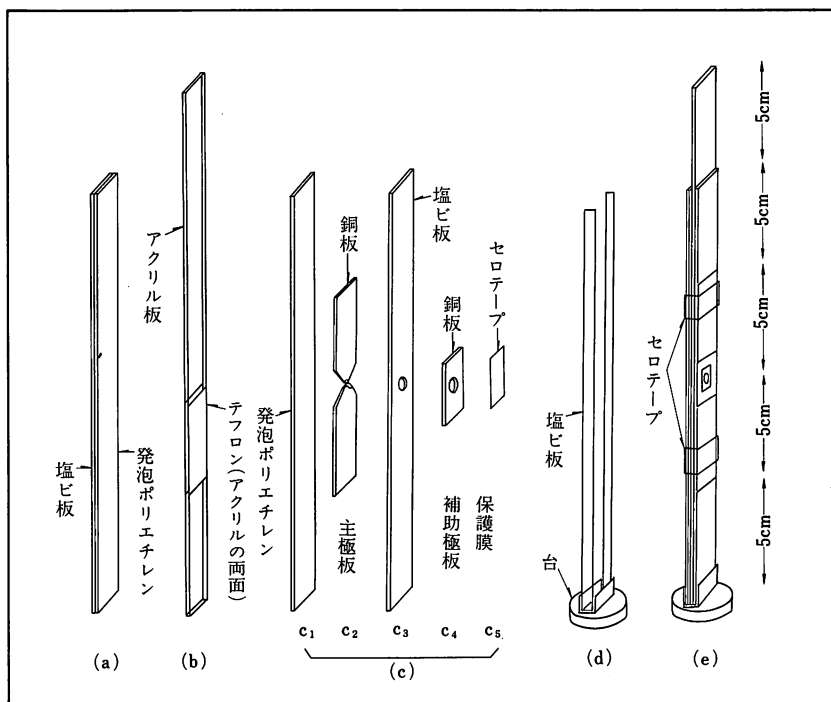


図1 静電誘導型火花発振器の製作

反射板からの反射波を受信するとシンクロスコープで電波の速さを測定することができる。

教具の製作

1. 静電誘導型火花発振器

図1に示すように、その主要部は(a)、(b)、(c)の3枚の板からできている。(a)は1mmの透明塩ビ板の片面に発泡ポリエチレンシート（荷造りなどの包装用）を貼り付けたもの。(b)は1mmの亚克力板の一部にテフロンテープ（日東電工製ニトフロンテープNo.903を東京都台東区秋葉原-2 坂口電熱K.K.で購入）を貼り付けたものである。

(c)は発泡ポリエチレン膜 C_1 と主電極板 C_2 （0.2mm銅板製）、1mm塩ビ板 C_3 、補助極板 C_4 （0.2mm銅板）および保護膜 C_5 を図の順序に貼り合わせたものである。接着には総てゴム系接着材（ボンドG）を用い、 C_1 は上下端で C_3 に接着、 C_2 は中央部のみで C_3 に接着（熱膨張による火花間隙の変化をさけるため）、 C_4 は全面 C_3 に接着する、 C_2 の先端は図のように0.5mmほどの部分を折り曲げておき、接着後にも火花間隙の調整を可能にしておく。火花間隙は0.05mmくらいが適当で、接着時に薄い紙をスペーサーとして入れておき、接着後に取り除く。 C_4 は主極板間に一定の電気容量を与えて電気振動を安定化するための極板、 C_5 は使用中に火花間隙に空中の塵埃が附着するのを防ぐためのものである。

(a)、(b)、(c)を重ねて(d)のようなホルダーの間に入れ、(e)のようにセロテープで軽く止める。

亚克力板の上部を手で持って5cmほど上下に動かすと、ポリエチレンとの摩擦によって亚克力は正に、テフロンは負に帯電し、その誘導によって2枚の主極板の間に電位差を生じ、火花放電が発生する。1回の運動で数十回の放電が起こり、1回の放電で放射される電波は波長約24cm、2～3個の波からなる短いパルスである。

2. 指向性共振器

干渉の実験にはパルスを長く（1パルス中の波の数を大きく）しなければならないし、進行波の反射や屈折の実験には指向性が必要である。図2のような指向性共振器を用いるとパルスをかなり長くした上指向性を与えることができる。

3. 受信アンテナ

(1) 電界アンテナ

全長10cmのダブルットアンテナで、UHF用の

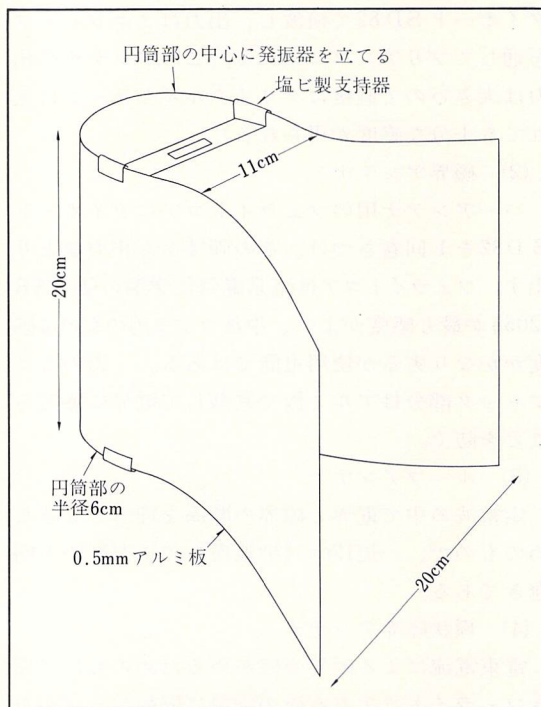


図2 指向性共振器

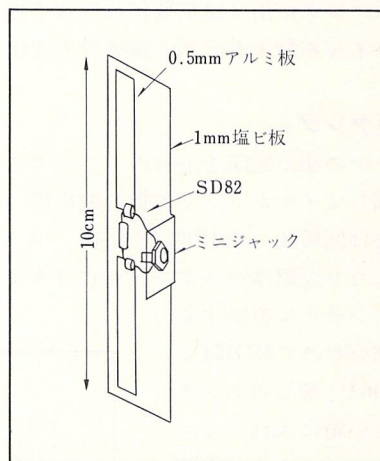


図3 電界アンテナ

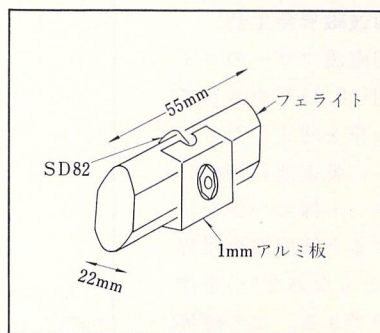


図4 磁界アンテナ

ダイオード SD 82で検波し、出力はミニジャックを通してプリアンプに入れる。(このアンテナの出力は大きいので直接にクリスタルイヤホンに入れても十分な感度が得られる)

(2) 磁界アンテナ

バーアンテナ用のフェライトコアにダイオード SD 82を1回巻きつけ、その両端から出力を取り出す。フェライトコアは東京電気化学製のQ₆CAR 22055が最も感度がよい、中波ラジオ用のものは感度がかなり劣るが使用可能ではある。力のミニジャック部分はアルミ板で遮蔽して電界に感ずることを防ぐ。

(3) ループアンテナ

定常波の中で電界と磁界の関係を理解させるためのもので、一辺12cm(半波長)の正方形の1回巻きである。

(4) 環状磁界アンテナ

電束電流による磁界を確かめるためのもので環状フェライトコアの直径の両端に同軸ケーブルを1回づつ巻きつけ、並列に接続して検波する。ドーナツ形のコアに沿う磁束変化には強く感じるが2個のコイルを結ぶ方向の一樣磁界の変化には感じない。

4. プリアンプ

アンテナの出力電圧を1石のトランジスタアンプで増幅してイヤホンその他の検出器(教師実験の場合は低周波の出力アンプを通してスピーカーを鳴らしたり豆電球やネオン管を点灯する)に入れる。アンテナに直結する方が好都合なので2SB54と乾電池006P、押しボタンスイッチを小箱に入れ、ミニジャックでアンテナに直結した。

5. 低周波磁界発生器

3V用直流プザーのコイルと並列に0.1μFを入れて接点の火花を防止したものを用いる。乾電池に接続してそのリード線の一部をループにすると低周波の磁界(電界をとまなわない)を作ることができる。この磁界中に磁界アンテナや環状磁

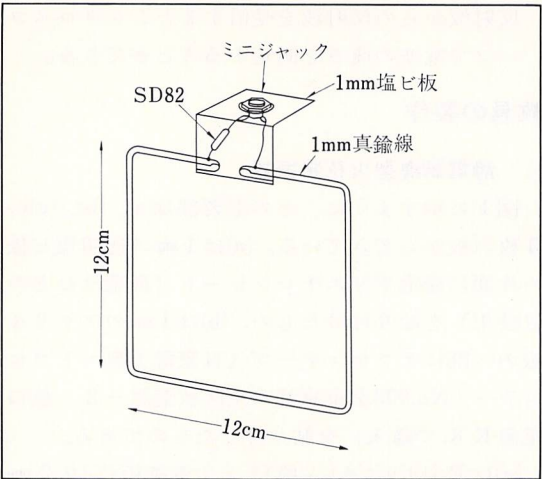


図5 ループアンテナ

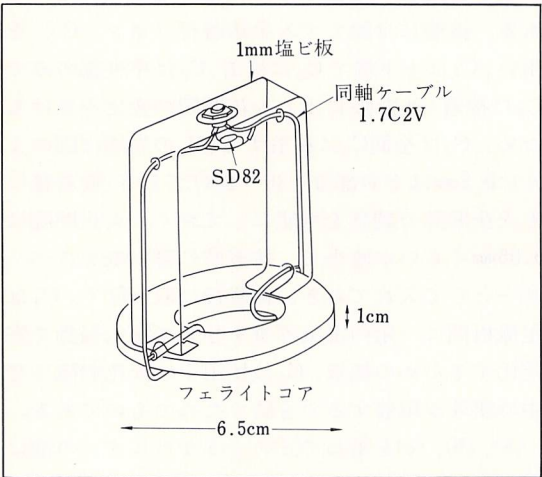


図6 環状磁界アンテナ

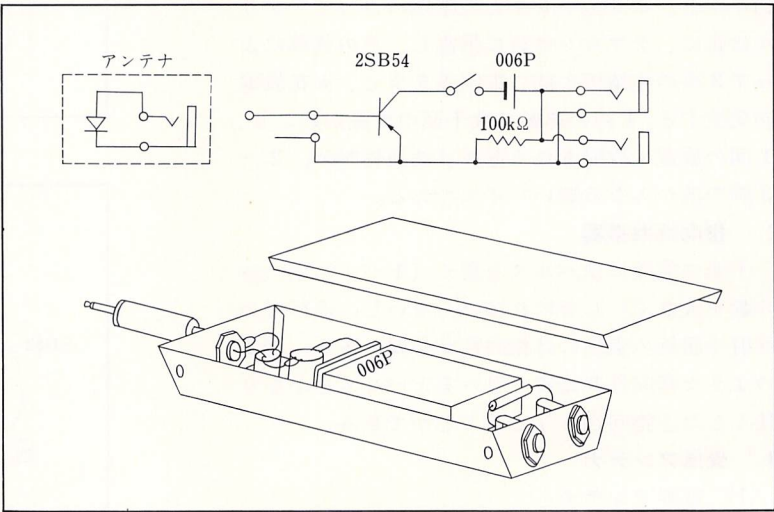


図7 プリアンプ

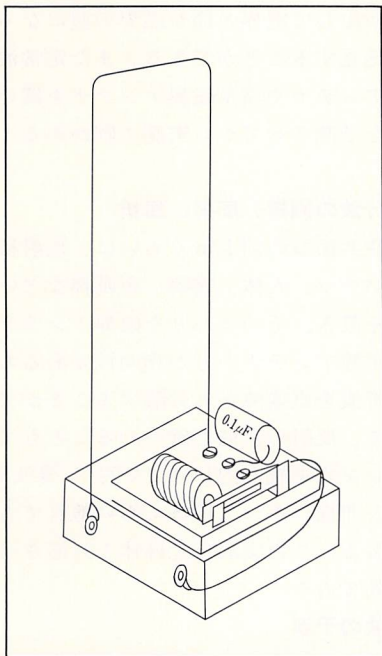


図8 低周波磁界発生器

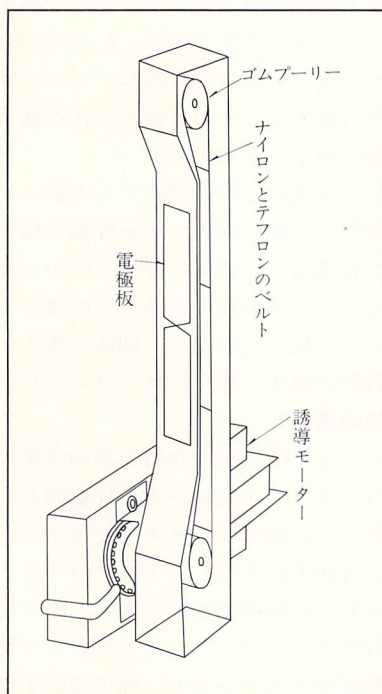


図9 電動式発振器

界アンテナ、ループアンテナを置いてその特性をしらべ、発振器のまわりの磁界と比較するために使用する。

6. 反射板

定常波を作るための反射板は、生徒用には30cm×50cmの0.5mmアルミ板を用い、教師実験用には、横の方からも実験がよく見えるように、同大の透明塩ビ板に1cm間隔で細い銅線を張った反射格子を用いた(この格子は90°回転すると電波をよく透過する)、反射板は半径1mくらいの円筒状に曲げて用いると定常波の節を遠方までよく観察することができる。また反射格子の銅線の間隔を10cmくらいにすると半透反射格子として、光の薄膜による干渉に相当する実験に用いることができる。

7. 屈折材料

数枚のレンガ、ポリバケツ入りの砂、積み重ねた書物などで定性実験が可能である。数十枚のレンガを立てて列べると導波器として使用できる。

8. 電動式発振器

電波の速さを測定する場合、シンクロスコープの掃引速度を大きくしなければならないので、パルス密度が小さいと画面が暗くて見えにくい。発振器のテフロンを貼ったアクリル板の代りにナイロン布のベルトにテフロン膜を貼り付け、ゴムプーリーにかけて小型誘導モーターで回転させるとパルス密度が大きくなってシンクロの画面が見やすくなる。

9. 大形指向性反射器

電波の速さ測定の場合、受信したパルスを増幅すると増幅器の時定数が問題になるので、大形の指向性反射器を使ってダブルレットアンテナに電波を集め、アンテナの出力を直接にシンクロスコープに入れた。この反射器は0.5mmのアルミ板で、焦点距離6cm、幅75cm、高さ50cmの放物柱面を作り、その焦点の中央にダブルレットアンテナを固定した。

学習指導方法

次のような一連の実験によって電磁波について考えさせたり具体的に理解させるのに利用する。

1. 発振器の原理

発振器の片方の極板を箔検電器に近づけ、もう一方の極板に手を近づけてアクリル板を動かし、箔の細かい振動と同時に電界アンテナに接続したイヤホンから音が聞こえることを確かめる。またアクリル板を引き抜き各部の電荷をしらべ、電気振動が起こるわけを考えさせる。

2. 発振器のまわりの電界・磁界

電界アンテナや磁界アンテナを発振器の近くで

動かし、電界・磁界の方向や大きさの分布をしらべる。

3. 電束電流による磁界

低周波磁界発生器の近くを磁界アンテナやループアンテナで走査して磁界分布をしらべておき、次に環状磁界アンテナをその磁界中に置き、環の中を電流が通らなければ感じないことを確かめる。その環状磁界アンテナを発振器の近くに置くと、その中を電流が通らなくてもよく感じるが、この場合は低周波磁界発生器の場合とちがって環の中の電界が変化しているので、これは電束電流による磁界に感じたといえる。

4. 反射板の前の定常波

反射板の前1 mくらいに指向性共振器を置き、その中で発振させると反射板の前に電界と磁界の定常波が生じる。これを電界アンテナと磁界アン

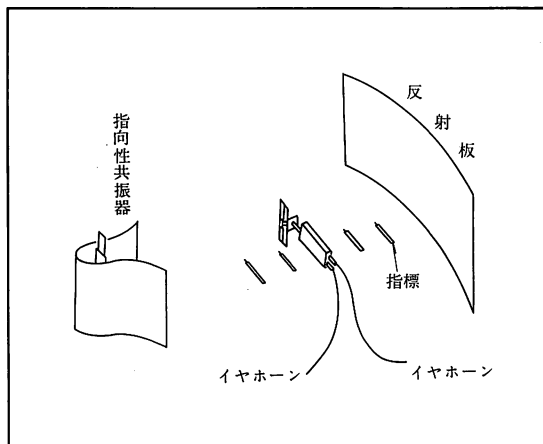


図10 反射板の前の定常波

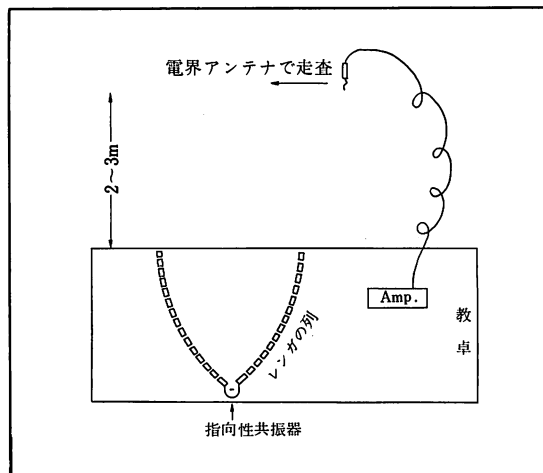


図11 2波源の干渉

テナで検出して電界の節が磁界の腹になっていることを発見することができる。また定常波の中にループアンテナや環状磁界アンテナを置いた場合の結果を予想させてから実測で確かめることもできる。

5. 進行波の回折、反射、屈折

指向性共振器の前1 mくらいに、反射板、砂入りポリバケツ、人体、書物、金属棒などいろいろな物体を置き、そのまわりを磁界アンテナで走査する。(磁界アンテナの方が指向性があるので反射波や屈折波を直接波から分離することができる) 反射板で、反射の法則を確かめることもできる。多数のレンガを教室に立てて列べ、導波器として用いると曲線にそって10 mくらい離れても十分な感度がある。この実験は光導体と対応させて用いると有効である。

6. 電波の干渉

光と電波を対応させて指導する場合、複スリットによる干渉と薄膜による干渉の実験が必要になる。波長が24 cmなので複スリットの干渉を教室内でやろうとすると装置が大きくなりすぎるので、図11のように大きい教卓上に20枚くらいのレンガを立てて導波器とし、その先端から出た電波の干渉縞を生徒の頭上で走査する。

薄膜による光の干渉に対応する実験としては、半透反射格子(細い銅線を10 cm間隔で塩ビ板に張る)を2枚重ねて、正面に近い方向からの電波を反射させ、その反射波や透過波を磁界アンテナで受信する。2枚の反射格子の間隔を変えてみると感度に数個の極大、極小を見つけることができる。

7. 電波の速さ

図12のように電動式発振器に指向性反射器をつけ、遠方の大きい金属板からの反射波を、指向性反射器をつけた電界アンテナで受信する。アンテナの出力は10 PFを通してシンクロスコープの垂直軸に入れ、内部同期で掃引する。先づ反射波がこない状態でトリガーレベルを調整して発振器からの直接波でトリガーさせ、掃引速度を最大にし、遠方からの反射波を入れてその時間遅れを測定する。写真1は掃引速度1 cm/μs × 5で直接波のみを入れた場合、写真2は距離35 mからの反射波を加えた場合のもので、この画面から読み取ると、電波が35 mを往復するに要した時間1.4 × 10⁻⁷ 秒、速さは5 × 10⁸ m/sとなる(この誤差はシ

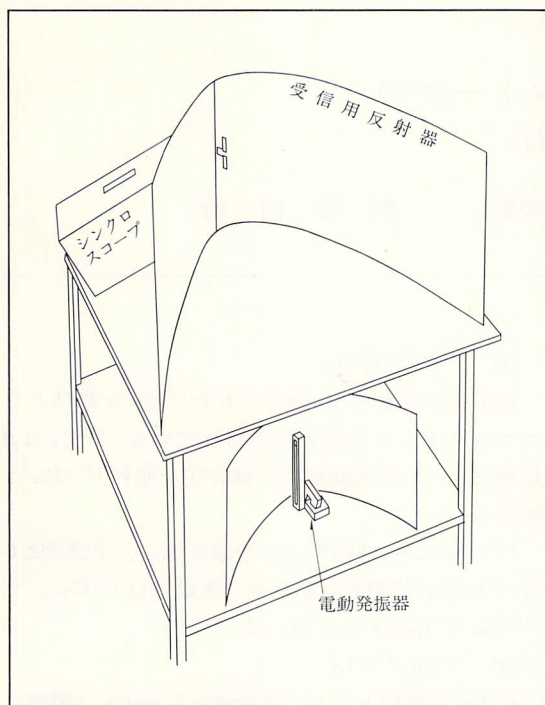


図12 電波の速さ測定

ンクロスコープの掃引速度の誤差であることが後に判明した)。

この実験は直接に授業中に行なうことが困難なのでVTRに取っておき、TVの画面から測定値を読み取らせ、計算させるような方法が有効である。

〔注〕写真3～22は85～87頁に掲載

効果

1. 上に述べたような一連の実験により、電磁波を具体的に認識させることができる。
2. 上記の実験は、水波、音、光を使ってこれに対応する実験が可能なので、それらも含めた一連の実験により「波」の一般的性質を把握させ

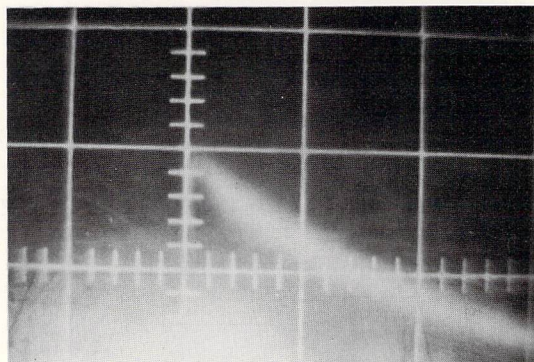


写真1 シンクロスコープの画面
直接波のみの場合

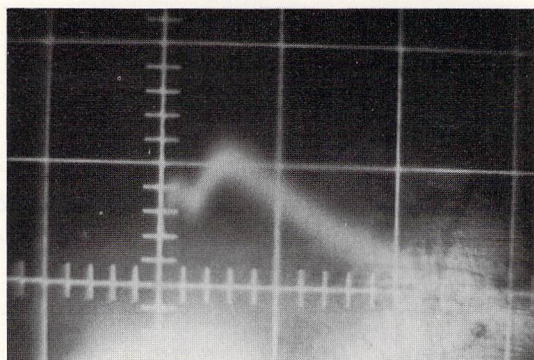


写真2 シンクロスコープの画面
直接波の上に、距離35mからの
反射波を入れた場合

ることができる。

3. 音波や光波の実験を終った後に、「電界、磁界の振動」として定常波の実験を取り扱うと、生徒に電磁波の存在を発見させることができる。
4. レーザーと回転シャッターを使うと、光速度も電波と全く同じ方法で測定できるので、光と電波の速さが等しいことをシンクロスコープの画面から直接に知ることができる。

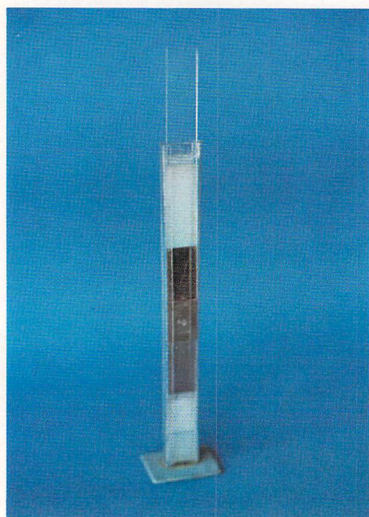


写真3. 静電誘導型火花発振器
上の透明部を手で持って上下に動かすと、波長24cmのパルス波を発振する。



写真4. 指向性共振器
この共振器により、鋭い指向性を与え、パルスを長くする。

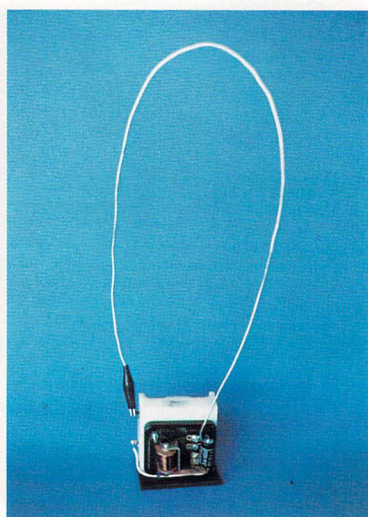


写真5. 低周波磁界発生器
上部のループに流れる低周波電流により、電界をとまなわない磁界を作る。



写真6. 電界アンテナ
 $\frac{\lambda}{2}$ のダブルツェットアンテナをプリアンプに取り付けてイヤホンで聞く。



写真7. 磁界アンテナ
直径2.2cmのフェライトコアにダイオードを巻き付けたバーアンテナ。

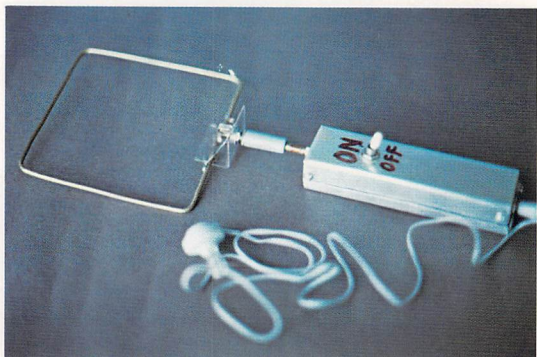


写真8. ループアンテナ
一辺 $\frac{\lambda}{2}$ の正方形ループアンテナで定常波中の電界と磁界の関係を確かめる。



写真9. 環状磁界アンテナ
環状コアの対向点にコイルを1回づつ巻いて並列にしたもので、電束電流による磁界を確かめる。



写真10. 発振器の原理
電極板の近くの電界の様子を検電器でし
らべる。

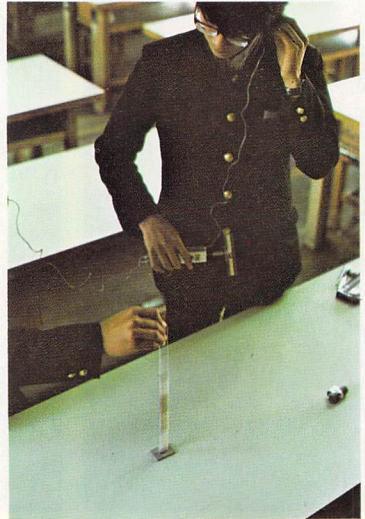


写真11. 発振器のまわりの電界
電界の向きや大きさの分布を電界ア
ンテナでしらべる。

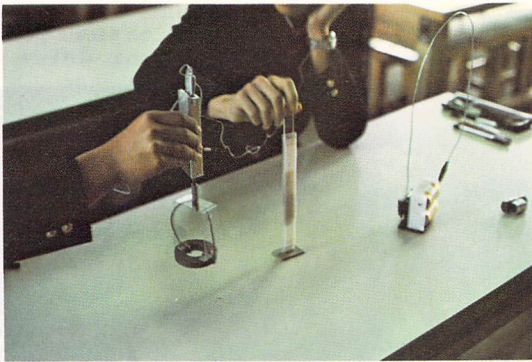


写真12. 電束電流が磁界を作る
環状磁界アンテナの中の電界が変化すると、フェ
ライトコアにそった磁界が発生する。



写真13. 電界の定常波
反射板の前に定常波を作り、電界の節の
位置に目標物を置く。



写真14. 磁界の定常波
磁界アンテナでしらべると、電界の節が
磁界の腹になっていることが見つかる。



写真15. 反射の法則
発振器と磁界アンテナを一定位置に置き、反射板
を動かして反射の法則をたしかめる。



写真16. 2枚の反射板による干渉
半透反射板を用いると光の薄膜による干渉
に相当する実験ができる。

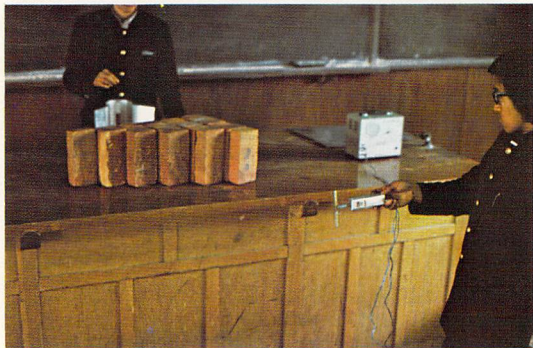


写真17. 電波の屈折
レンガを立て列べたプリズムで電波の屈折
を確かめる。

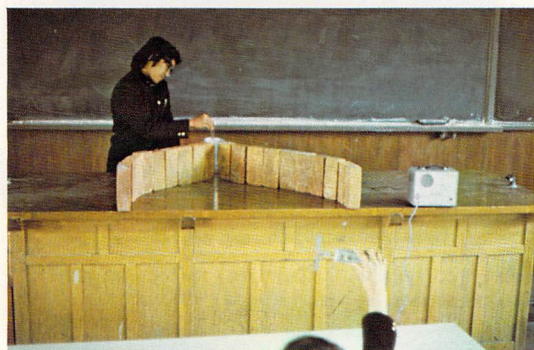


写真18. 2波源の干渉
レンガを列べた導波器の先端から放射された電波
によって教室内に干渉じまができる。

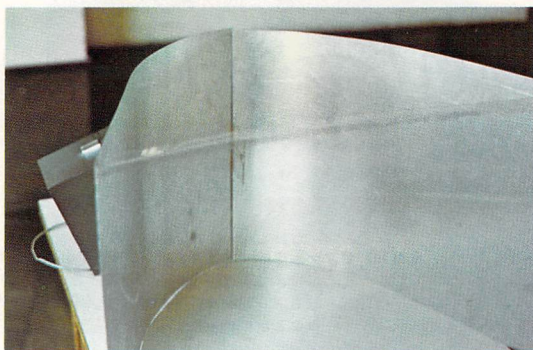


写真20. 指向性反射器
放物柱面状の反射板の焦点に電界アンテナを置く
と遠方からの電波を受信できる。



写真19. 電動発振器
ナイロンとテトロンベルトを回し
て発振するとパルス密度の高い電波
が得られる。

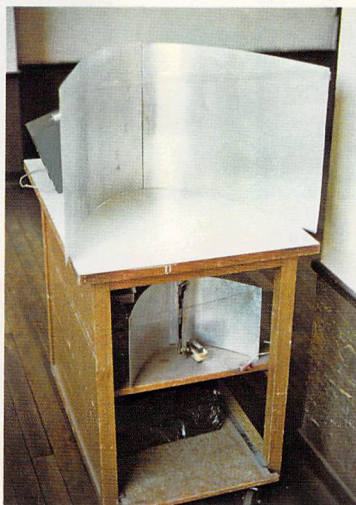


写真21. 電波の速さ測定装置
台の下段にパラボラ反射器を付けた
電動発振器を、上段に受信アンテナ
とシンクロスコップを置く。

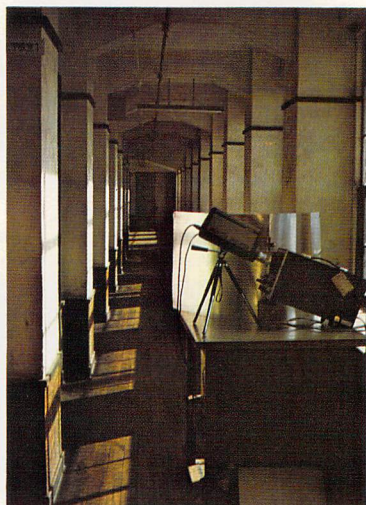


写真22. 電波の速さを測る廊下
突き当たりが反射板に使う防火扉、
手前の装置は写真21を後から見たも
の。