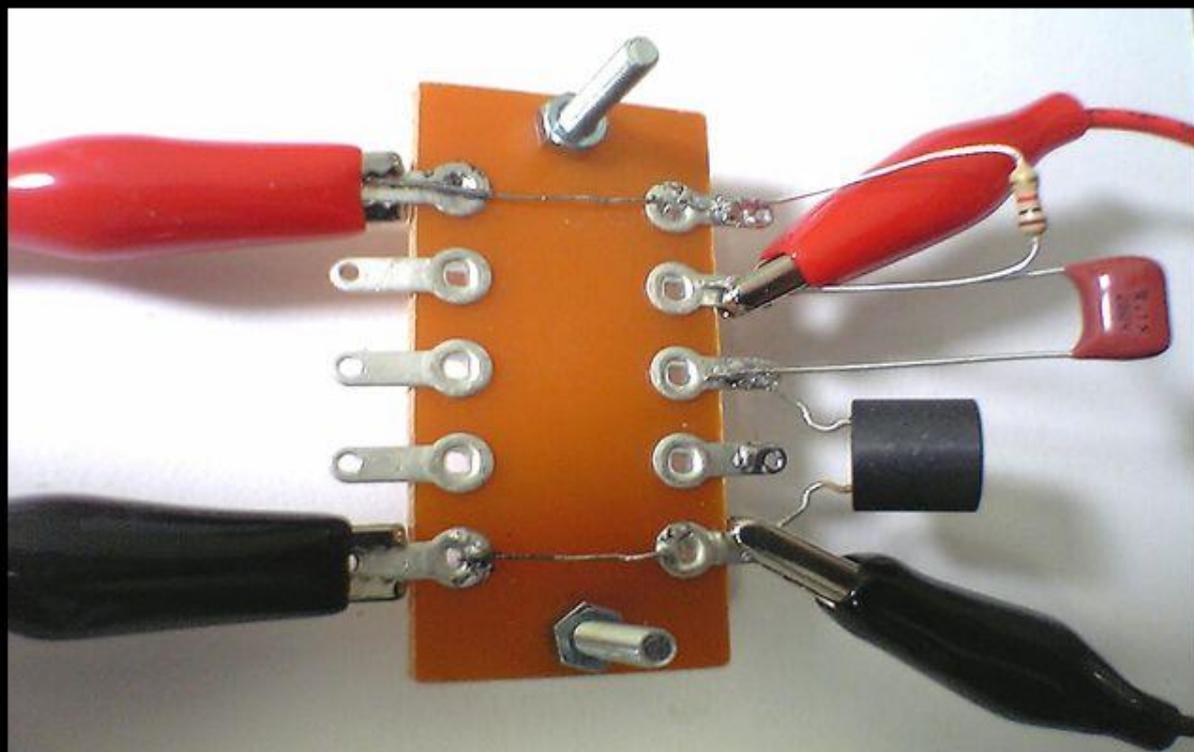


## LC 結合回路の実験

インダクタンス  $L$  とコンデンサ  $C$  と抵抗  $R$  を、直列または並列接続した回路の周波数特性を、発振器とオシロスコープを用いて観察し、理解する。



# インダクタンス (コイル) ( 1個 60円 )

## 表示の読み方



1R0.....	1μH
100 .....	10μH
101.....	100μH
102.....	1,000μH ( 1mH)
103.....	10,000μH (10mH)

K は 誤差 ± 10% を示す



底面からコイルが見える



これもインダクタンス

102 = 1mH



コンデンサ（フィルムコンデンサ 1個 50円）

表示の読み方

（250V は、耐圧 250V の意味。実験では、数V しか加わらない。）

$$1.0 \text{ K} = 1.0 \mu\text{F}$$

$$.1 \text{ K} = 0.1 \mu\text{F}$$

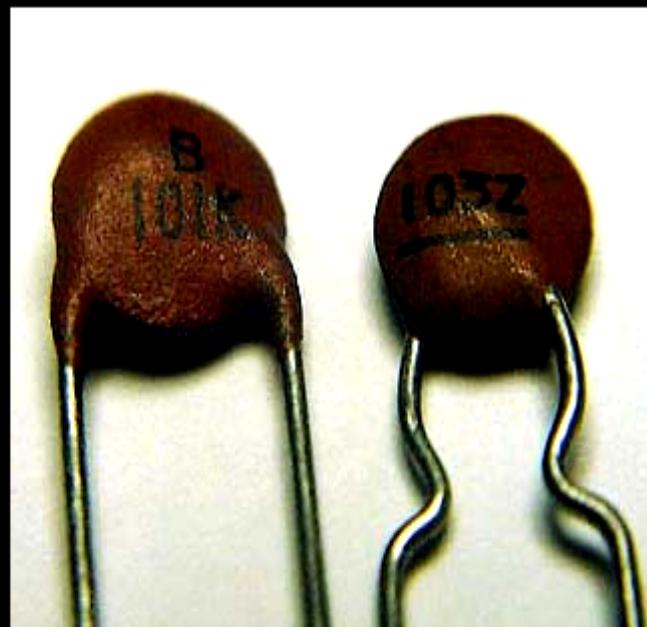
$$.033 \text{ K} = 0.033 \mu\text{F}$$



# コンデンサ

構造的には金属板を絶縁を保ったまま極めて近く平行に配置したもので、電気を貯めたり直流をカット(交流は通過)させたりという用途に使われる。コンデンサも構造により幾種類もあり、それぞれ主用途が違うので使い分ける必要がある。

## セラミックコンデンサ



左図はセラミックコンデンサ。最も一般的に使用される。安価でもあるが、本体がセラミック製(陶磁器)であるため湿気や温度等の変化に弱い。極性はない。

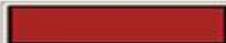
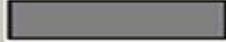
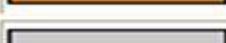
値の読み方は抵抗と似ていて、最初の2文字まではそのまま読み、3文字目を抵抗と同じく10の何乗として乗じて計算する。こうして算出された値は単位がpF(ピコファラッド)であるため、通常使われる $\mu$ F(マイクロファラッド)に変換するにはその値を1000000(百万)で割る。

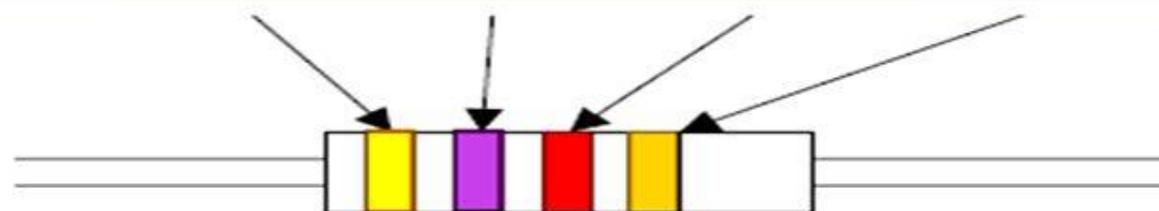
例:104... $10 \times 10$ の4乗 =  $10 \times 10000 = 100000 \text{ pF} = 0.1 \mu\text{F}$   
473... $47 \times 10$ の3乗 =  $47 \times 1000 = 47000 \text{ pF} = 0.047 \mu\text{F}$

ただし、100pF以下の容量の場合は直接その容量を記載している。

# 抵抗のカラーコード表

抵抗器 1個 4円

		第1色帯	第2色帯	第3色帯	第4色帯
		第1数字	第2数字	乗数	許容差%
	黒	0	0	1	
	茶	1	1	10	
	赤	2	2	10 <sup>2</sup>	±2
	橙	3	3	10 <sup>3</sup>	
	黄	4	4	10 <sup>4</sup>	
	緑	5	5	10 <sup>5</sup>	
	青	6	6	10 <sup>6</sup>	
	紫	7	7	10 <sup>7</sup>	
	灰	8	8	10 <sup>8</sup>	
	白	9	9	10 <sup>9</sup>	
	金			10 <sup>-1</sup> (0.1)	±5
	銀			10 <sup>-2</sup> (0.01)	±10
	無着色				±20



黄 紫 赤 金  
4 7 x 100 5% 4700Ω 5%  
(即ち 4.7kΩ 5%)

数種類の抵抗器とコンデンサとインダクタンス(コイル)が用意してあるので、各自、1個ずつ選択し、ラゲ板にLCR直列回路を組む。

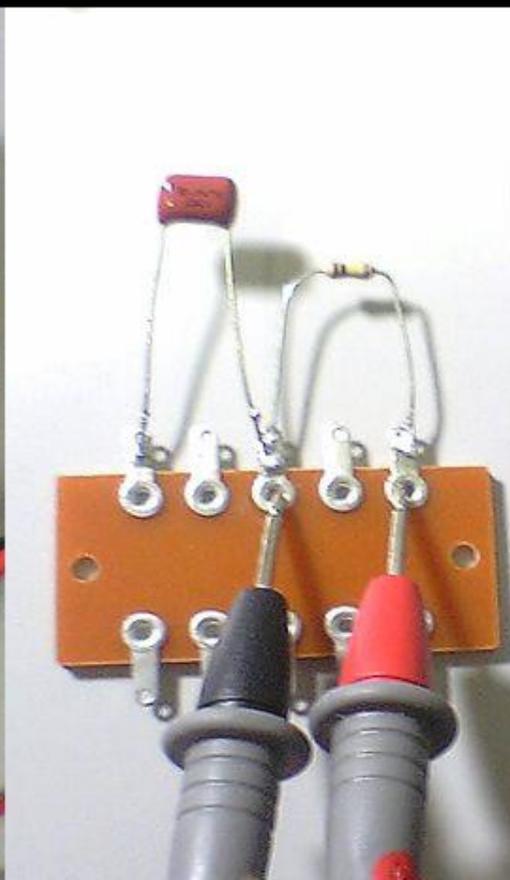
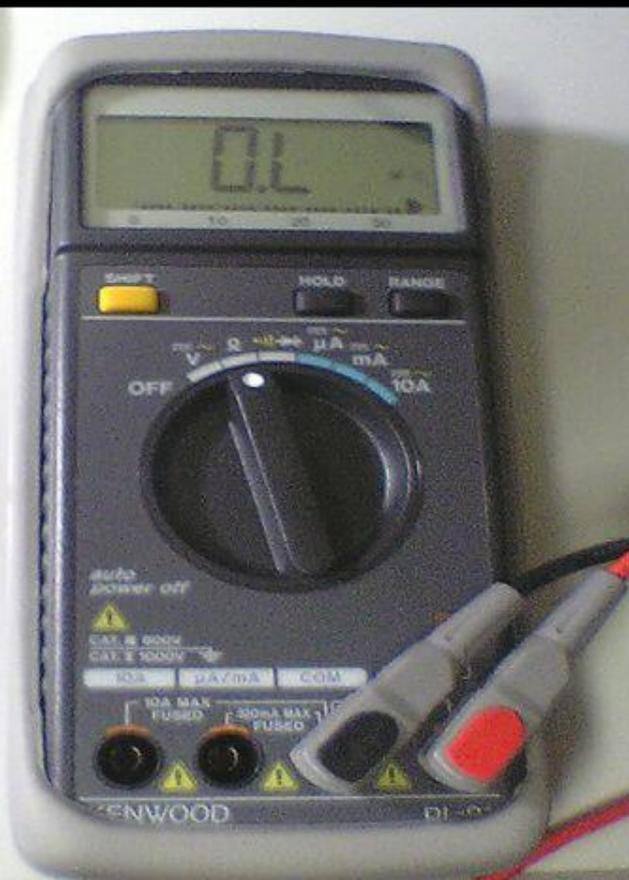
まず、選んだインダクタンスとコンデンサの値からLC結合回路の共振周波数を計算する。

測定器の性能上、LR結合回路の共振周波数  $f$

$$f = 1 / (2 \pi \sqrt{LC}) \quad L: \text{ヘンリー(H)} \quad C: \text{ファラッド (F)}$$

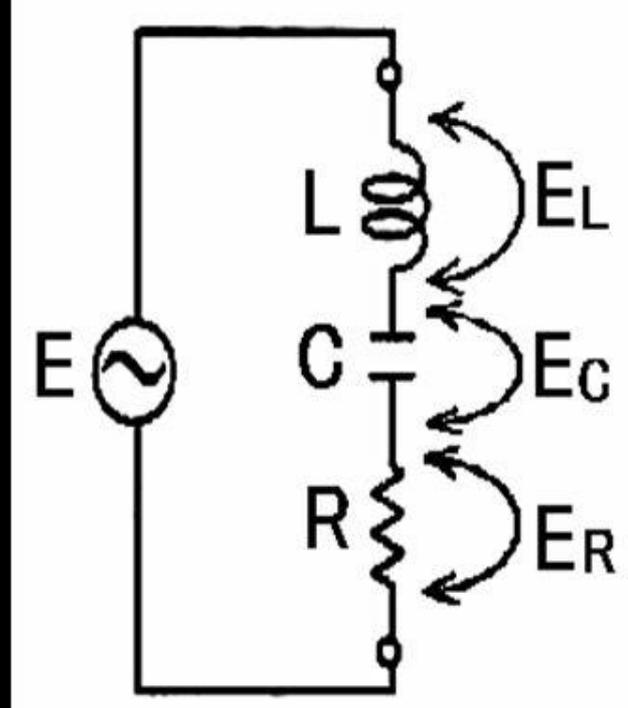
$f$  の値が、1000 Hz 以上、1000000 Hz ( 1 MHz) 以下になるように、コンデンサとインダクタンスを選んで下さい。

自分の選択した抵抗器の値を、カラーバーから読んで、それを確認するために、テスタで測定してください。  
1 k  $\Omega$  ~ 100 k  $\Omega$  程度の抵抗を使用してください。  
測定プラグは、赤を1番右、黒を右から2番目のソケットに差し込む。  
測定選択つまみを  $\Omega$  にして、抵抗両端の抵抗値を測る。



## LCR 直列回路（直列共振回路）

インダクタンス(コイル) $L$  (H)、  
キャパシタンス(コンデンサ) $C$  (F)、  
レジスタンス(抵抗) $R$  ( $\Omega$ ) が  
直列に接続された回路。



入力交流信号（電圧  $E$ ）の周波数を解析、弁別することができる。

ラジオの周波数設定（選局、チューニング）、  
周波数解析装置などに利用される回路。

入力交流信号  $E$  (周波数  $f$ , 角速度  $\omega=2\pi f$ ) が加わると、  
 $L$ 、 $C$ 、 $R$  の各素子は直列なので、等しい電流  $I$  が  
各素子に流れる ( $I=I_L=I_C=I_R$ ) が、  
各素子に発生する電圧  $E_L$ 、 $E_C$ 、 $E_R$  は位相が異なる。

$E_L$  の大きさは  $I X_L = I \omega L$

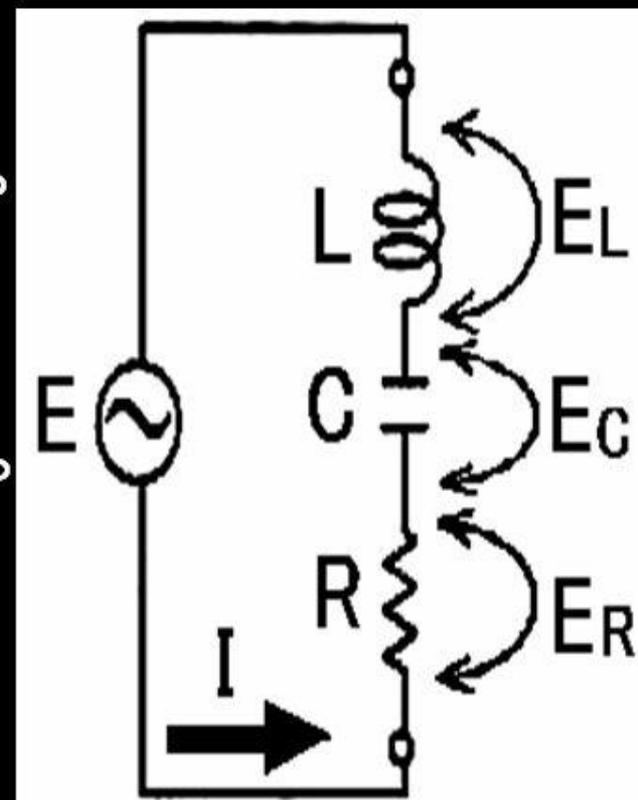
位相は電流より  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) 進んでいる。

$E_C$  の大きさは  $I X_C = I / \omega C$

位相は電流より  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) 遅れている。

$E_R$  の大きさは  $I R$

位相は、電流と同じ。



# コンデンサに交流電流が流れるときの現象

静電容量(キャパシタンス)が  $C$  (F) のコンデンサに、交流電流  $I$  が流れ込むと、コンデンサの電荷  $Q$  が増加する。電流とは1秒あたりの電荷の移動量なので

$$I = dQ / dt$$

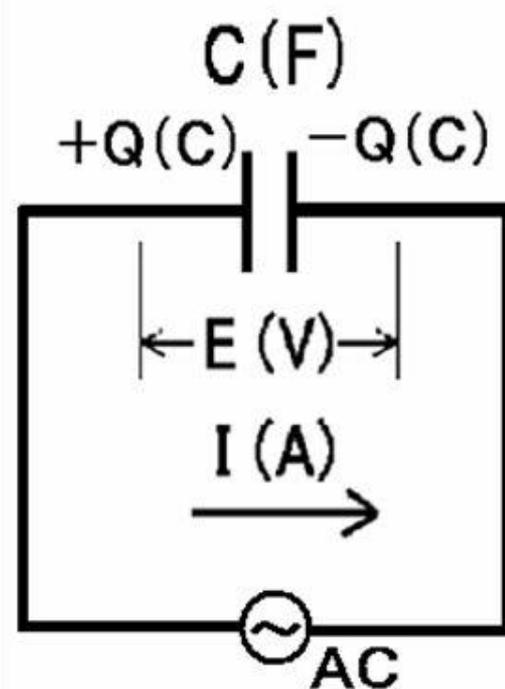
コンデンサに発生する電圧  $E$  (V) と電流  $I$  (A) の関係は、 $Q = CE$  より、  $I = C dE/dt$

$I = I_m \sin(\omega t)$  とすると、

$$E = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{I_m}{C} \int \sin(\omega t) dt$$

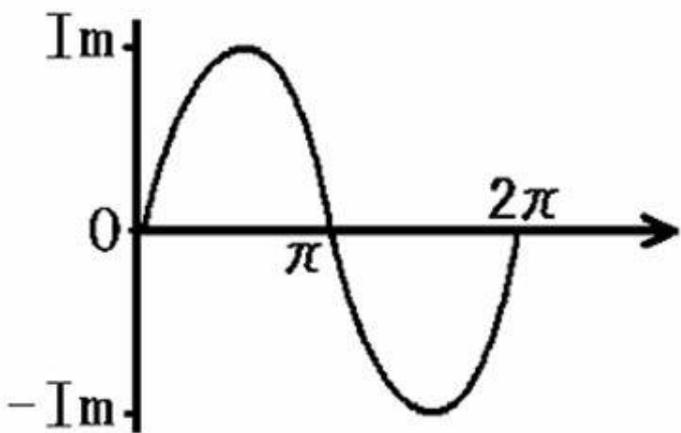
$$= -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t) = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$E = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (E_m = \frac{I_m}{\omega C})$$

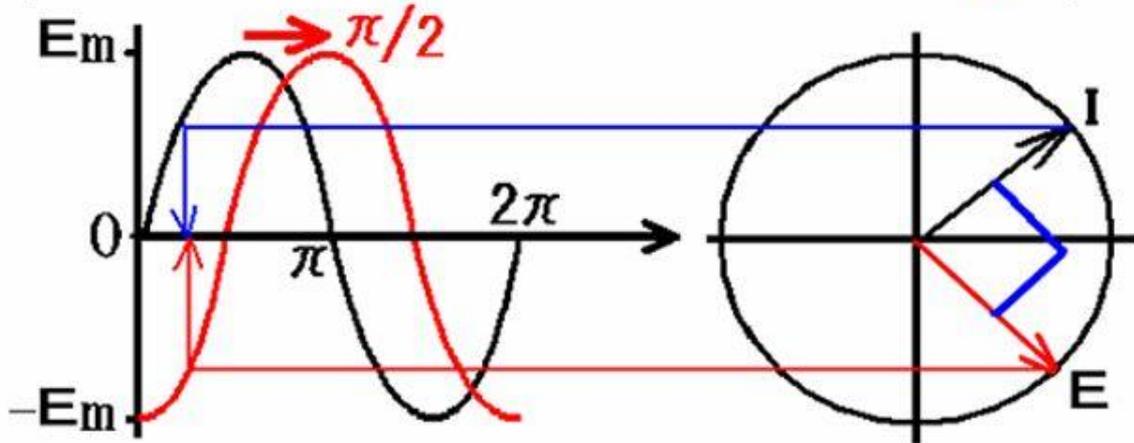


コンデンサに発生する交流電圧は、電流より  $\pi/2$  位相が遅れている。

$$I = I_m \sin(\omega t)$$



$$E = -E_m \cos(\omega t) = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$



コンデンサに電流が流れ込んでから電圧が発生し、電流が流出した後に電圧が減衰する。風船に出し入れする空気量と圧力の関係と同じ。

オームの法則(電圧=電流 x 抵抗)と、 $E_m = I_m / \omega C$  から、交流電流に対するコンデンサの抵抗(インピーダンス) $X_C$  は、 $X_C = 1 / \omega C$  (単位  $\Omega$ )。これを容量リアクタンスという。静電容量  $C$  が大きいほど、 $X_C$  は小さい。

(大きい風船ほど発生する圧力が小さい) reactance 【名】〔電気〕誘導抵抗。

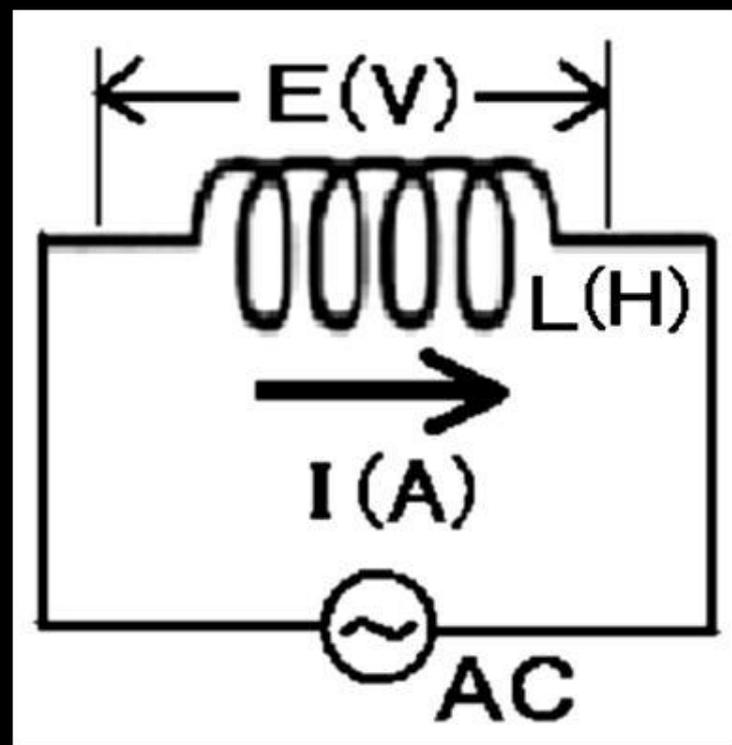
# インダクタンス(コイル)に交流電流が流れるときの現象

インダクタンス  $L$  (H) のコイルに ( $n$  回巻きの総和で  $L$  とする)、交流電流  $I$  (A) を流したとき、発生する電圧  $E$  (V) は、

$$E = L \, dI / dt$$

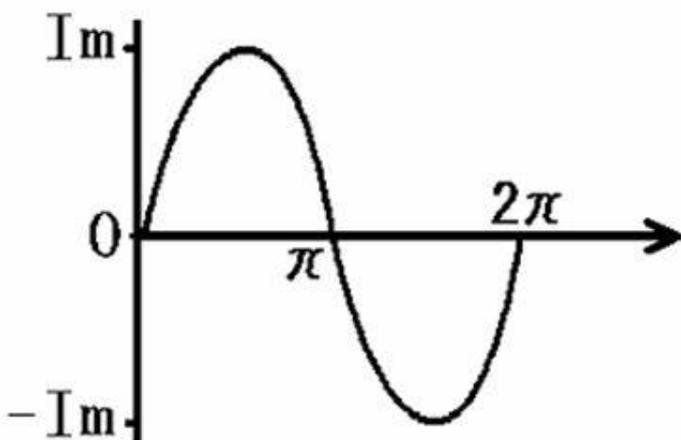
$I = I_m \sin(\omega t)$  を代入すると、

$$\begin{aligned} E &= I_m \omega L \cos(\omega t) \\ &= I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2) \\ &= E_m \cos(\omega t) \\ &= E_m \sin(\omega t + \pi/2) \\ & \quad (E_m = I_m \omega L) \end{aligned}$$

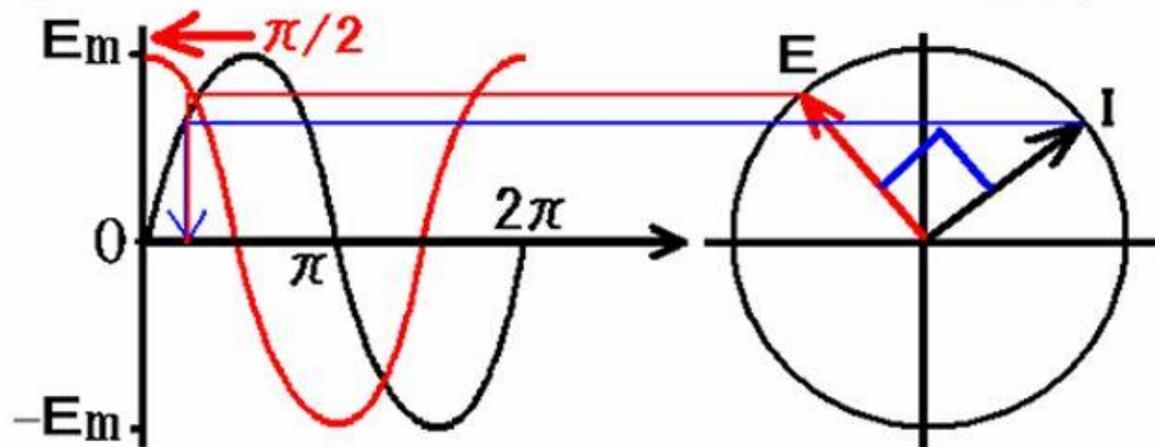


コイルに発生する交流電圧は、電流より  $\pi/2$  位相が進んでいる。

$$I = I_m \sin(\omega t)$$



$$E = E_m \cos(\omega t) = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

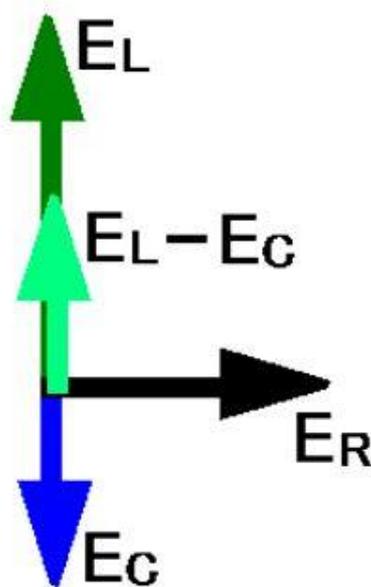
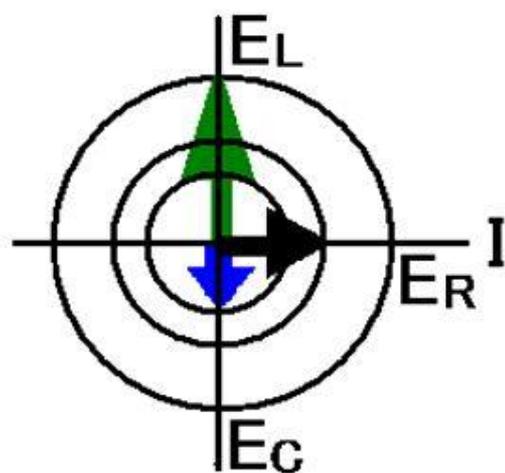
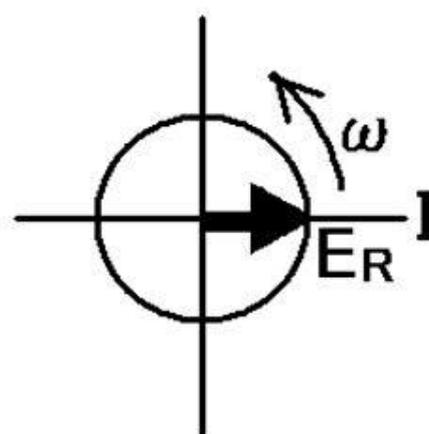
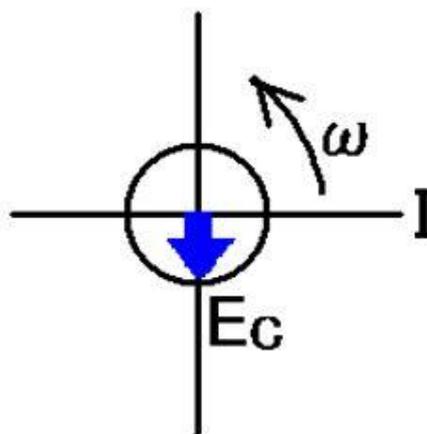
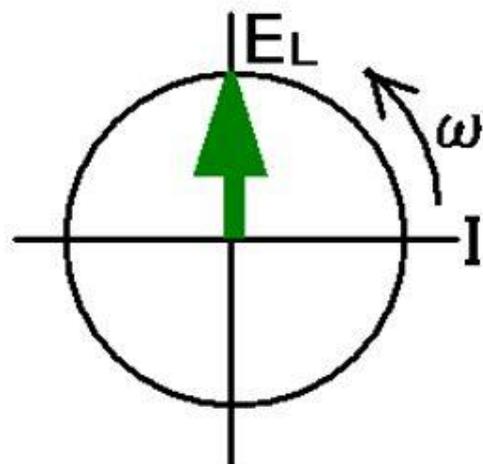


コイルに電流が流れ始めると、それを阻止する方向に電圧が発生し、電流の増加率が下がると、それを阻止する方向に逆電圧が発生する。電磁誘導は、自然が変化を嫌うために生じる現象。

オームの法則(電圧=電流 x 抵抗)と、 $E_m = I_m \omega L$  から、交流電流に対するコイルの抵抗(インピーダンス) $X_L$  は、 $X_L = \omega L$  (単位  $\Omega$ )。これを誘導リアクタンスという。巻き数が多い(誘導係数  $L$  が大きい)ほど、 $X_L$  は大きい。

LCR直列回路に流れる交流電流  $I$  を、円運動の射影と考えると、

$E_L$  は  $90^\circ$  進んでいる。  $E_C$  は  $90^\circ$  遅れている。  $E_R$  は電流と同じ位相。

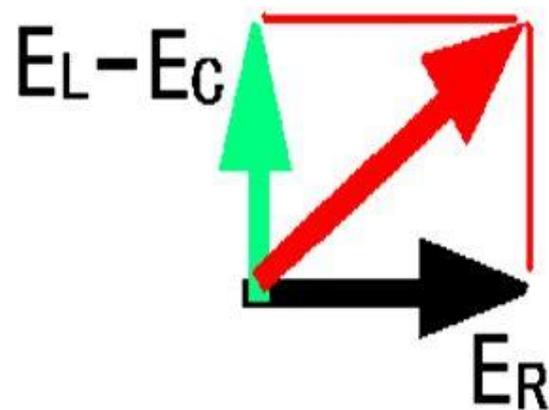


電圧のベクトル和

$$\sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

## 電圧のベクトル和

$$\sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$



$$E_R = I R$$

$$E_L = I \omega L$$

$$E_C = I / \omega C \quad \text{を代入すると}$$

$$E = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

LCR直列回路のインピーダンス  $Z$  は、

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

resonator【名】〔電気〕共振回路.

resonance【名】〔電気〕(波長の)同調,共振;

$\omega L - \frac{1}{\omega C}$  が 0 になる周波数で、回路のインピーダンスが最小になる。

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

共振周波数 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
-------------------------------------

数種類の周波数の交流電気信号が入っているとき、

周波数  $f (= 1/(2\pi\sqrt{LC}))$  の交流信号にのみ、インピーダンスが低い。

LCR直列回路は、特定の周波数  $f$  の交流信号だけよく通す。

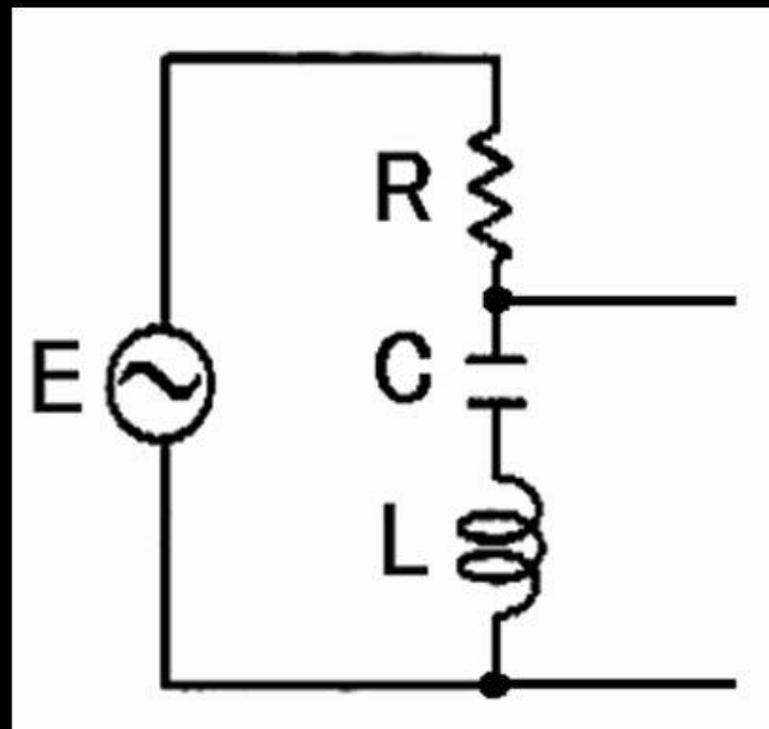
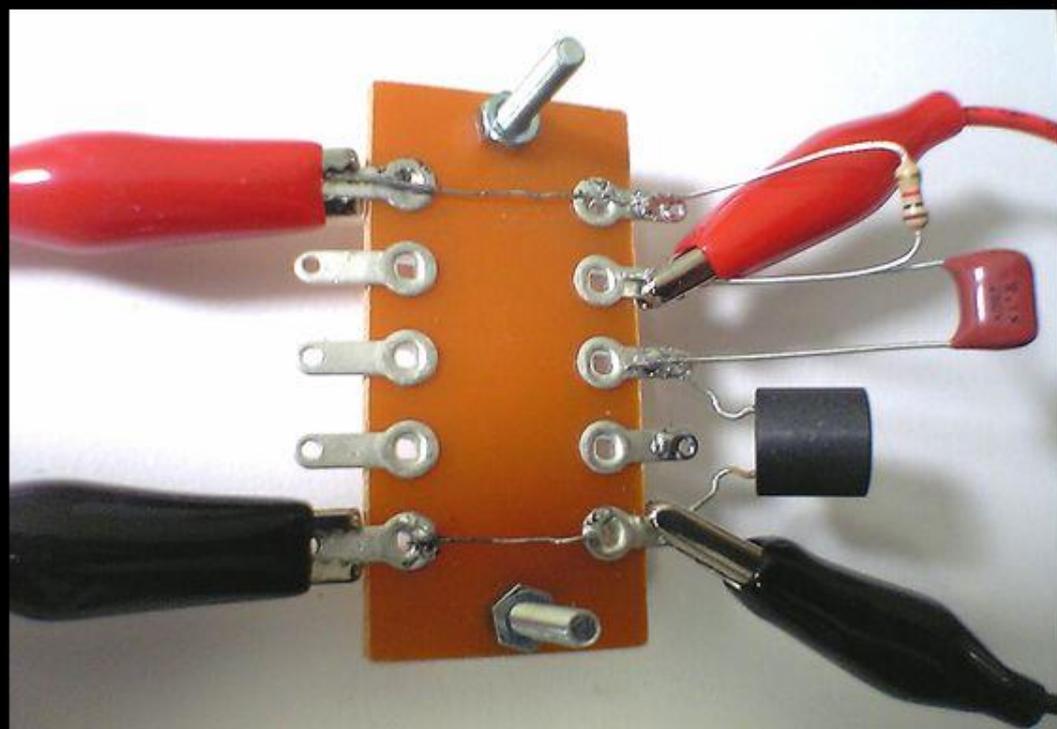
これを共振周波数という。(Resonant Frequency)

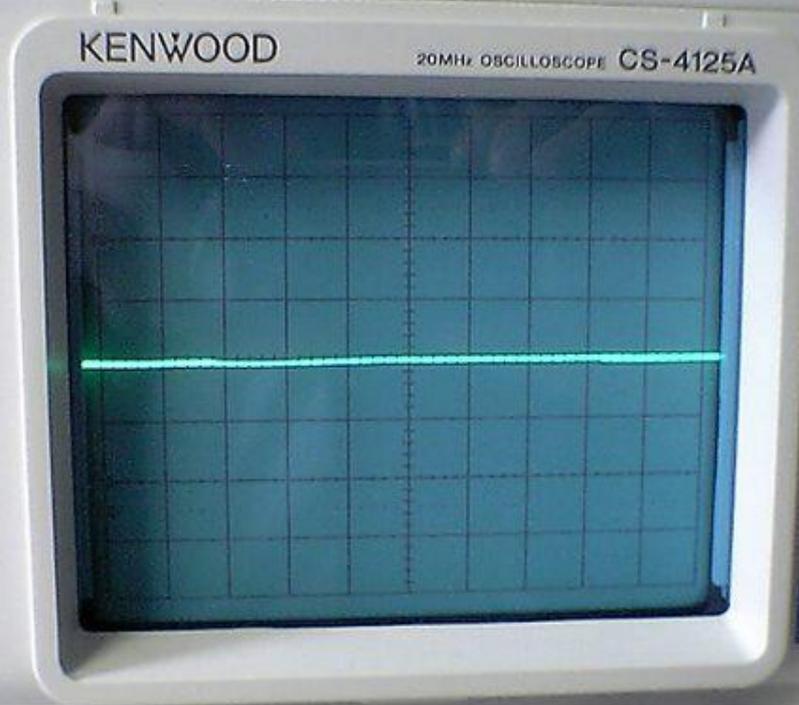
# 実験 1 LC 直列共振回路

LCR直列回路の両端に、発振器信号を接続。

LC直列回路の両端を、オシロスコープに接続。

抵抗  $R$  がないと、発振器信号が直接オシロスコープに入力されてしまう。



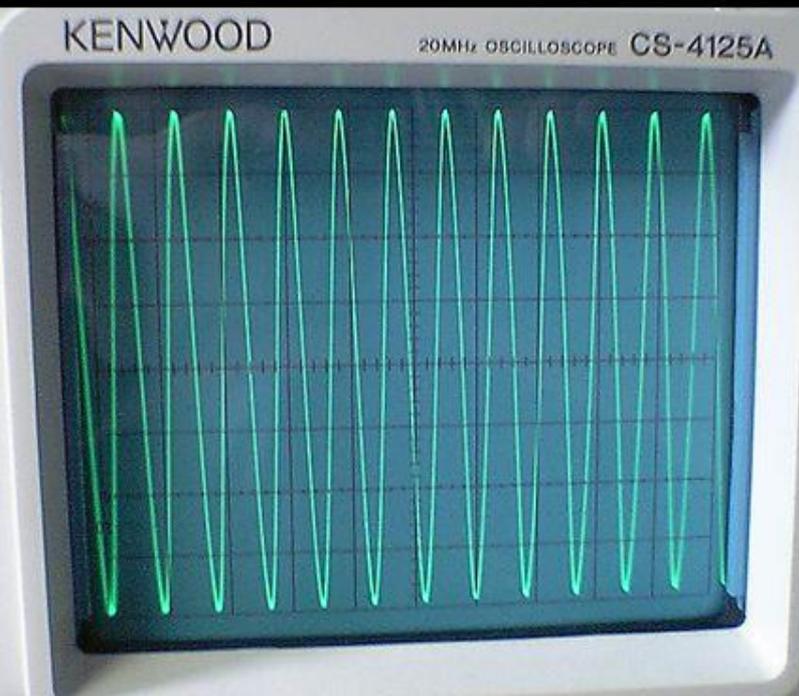


発振器の周波数を、計算で求めた  
共振周波数に設定する。

LC直列電圧が、0 になることを確認。

次に、共振周波数から周波数を上げる、  
または 下げることによって、

振幅が最大になる周波数を見つけて  
振幅を4cmに設定する。



装置の性能上、極端に低い周波数、  
高い周波数では 振幅が下がるので  
注意してください。

**発振器の周波数を、再度、共振周波数に設定する。**

**振幅が 0cm になることを確認する。**

**次第に周波数を下げ、振幅が**

**0.4cm (10%)、0.8cm (20%)、1.2cm (30%)、1.6cm (40%)、  
2.0cm (50%)、2.4cm (60%)、2.8cm (70%)、3.2cm (80%)、  
3.6cm (90%)、4.0cm (100%)**

**を示す周波数を記録する。**

**また共振周波数に戻してから、周波数を上げ、振幅が**

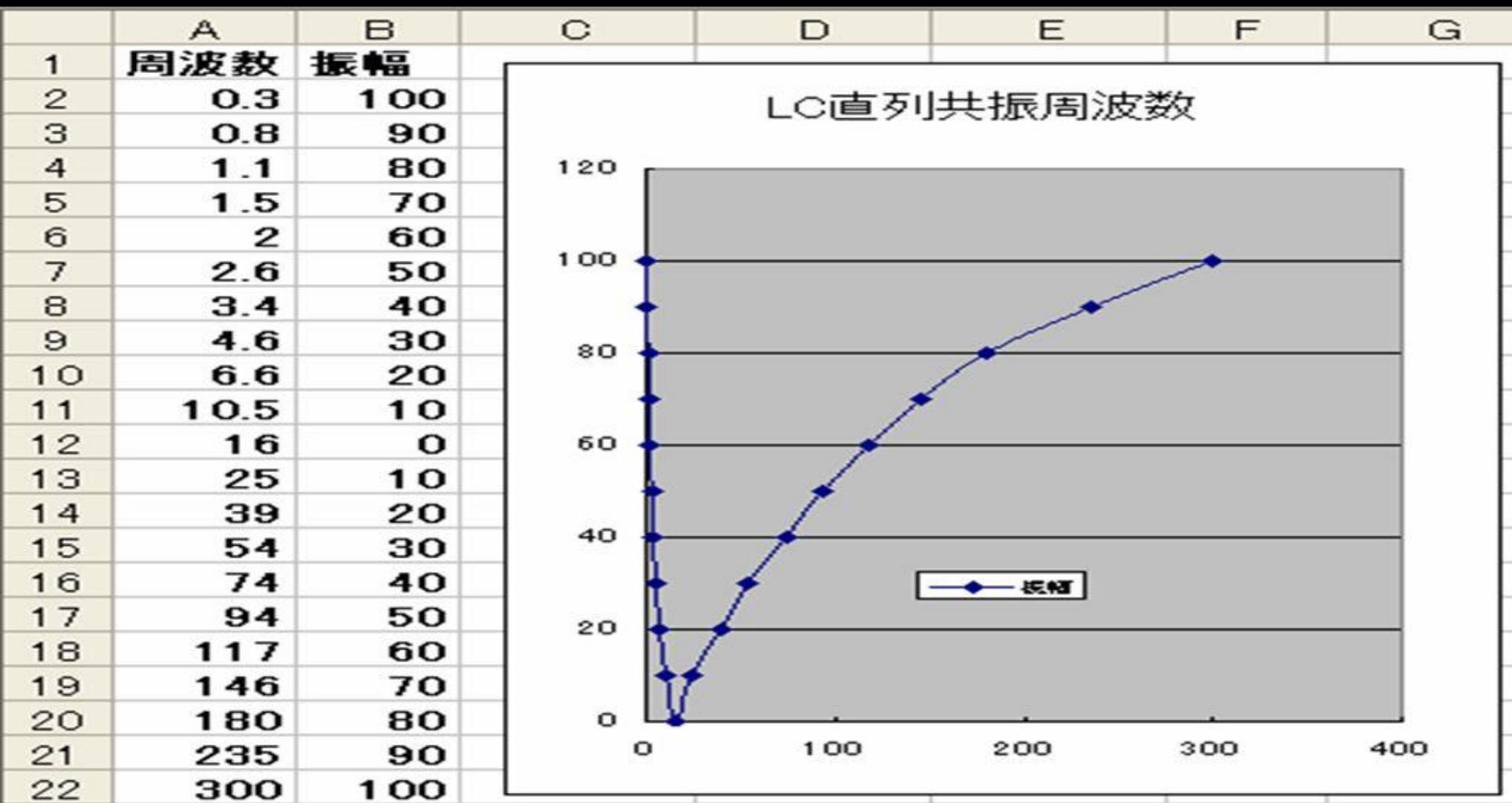
**0.4cm (10%)、0.8cm (20%)、1.2cm (30%)、1.6cm (40%)、  
2.0cm (50%)、2.4cm (60%)、2.8cm (70%)、3.2cm (80%)、  
3.6cm (90%)、4.0cm (100%)**

**を示す周波数を記録する。**

測定結果を、エクセルでグラフ表示してください。

LC直列回路は、共振周波数でインピーダンスが最小になり、

オームの法則で、電圧も最小になることを理解して下さい。



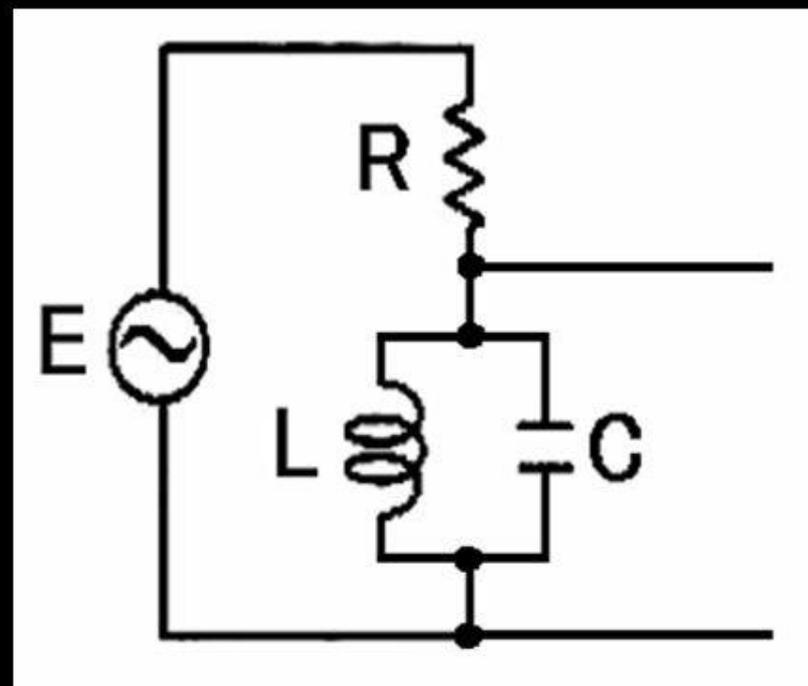
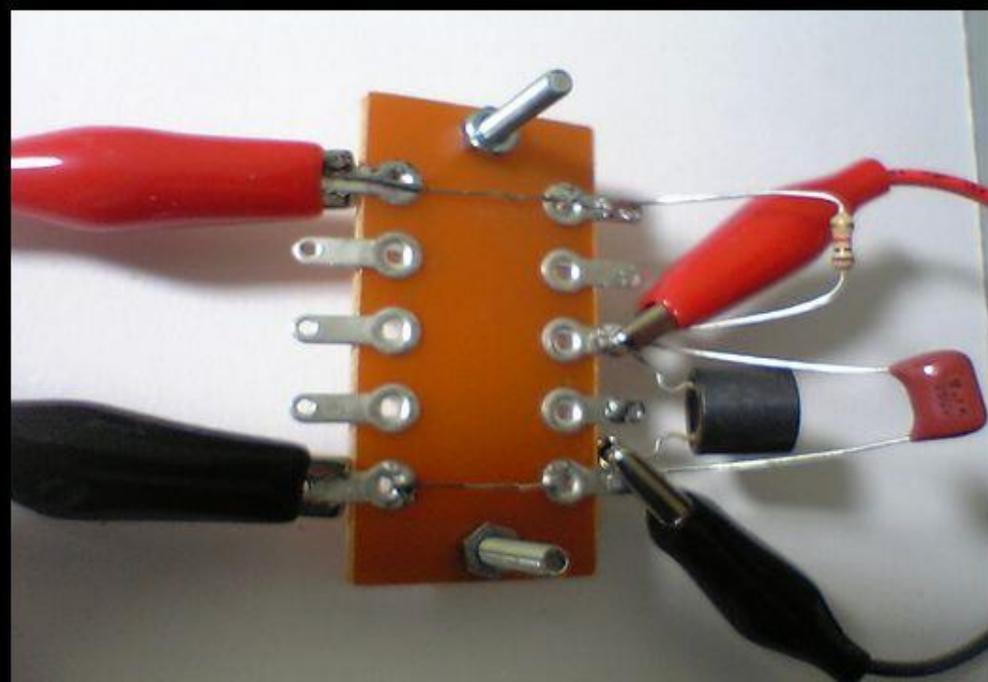
## 実験 2 LC 並列共振回路

インダクタンスとコンデンサを並列に接続する。

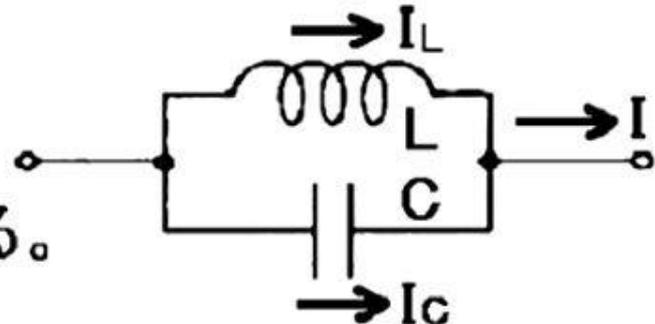
LCR回路の両端に、発振器信号を接続。

LC並列回路の両端を、オシロスコープに接続。

抵抗  $R$  がないと、発振器信号が直接オシロスコープに入力されてしまう。



## LC 並列回路



並列なので、L と C に同じ電圧 E が かかる。

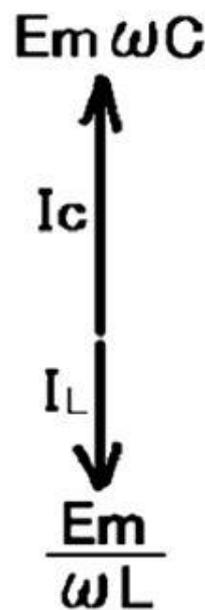
$$E = E_m \sin(\omega t)$$

$$I_C = E / (1 / \omega C) = E_m \omega C \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$I_L = E / (\omega L) = \frac{E_m}{\omega L} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

コンデンサの電圧は電流より $90^\circ$ 遅れる。  
コイルの電圧は電流より $90^\circ$ 進む。

コンデンサの電流は電圧より $90^\circ$ 進む。  
コイルの電流は電圧より $90^\circ$ 遅れる。

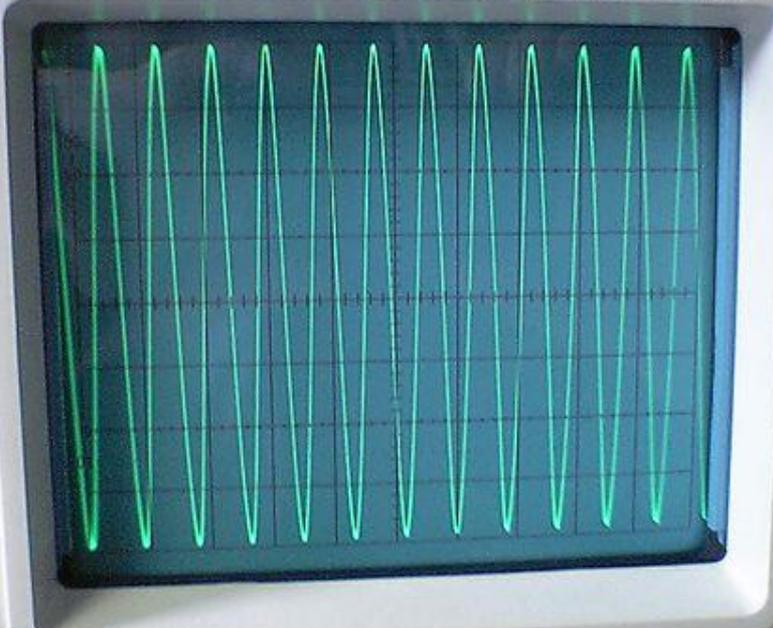


$$I = I_C - I_L = E_m \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad Z = \frac{E_m}{I} = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$$

インピーダンス Z は、 $\omega$  が  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  のとき無限大になる。

KENWOOD

20MHz OSCILLOSCOPE CS-4125A



発振器の周波数を、計算で求めた  
共振周波数に設定する。

LC並列電圧が、最大になることを確認。  
最大振幅を4cmに設定する。

次に、共振周波数から周波数を上げる、  
または下げることによって、  
振幅が下がることを確認する。



発振器の周波数を、再度、共振周波数に設定する。

振幅が 4cm になることを確認する。

次第に周波数を下げ、振幅が

3.6cm (90%)、3.2cm (80%)、2.8cm (70%)、2.4cm (60%)、  
2.0cm (50%)、1.6cm (40%)、1.2cm (30%)、0.8cm (20%)、  
0.4cm (10%)

を示す周波数を記録する。

また共振周波数に戻してから、周波数を上げ、振幅が

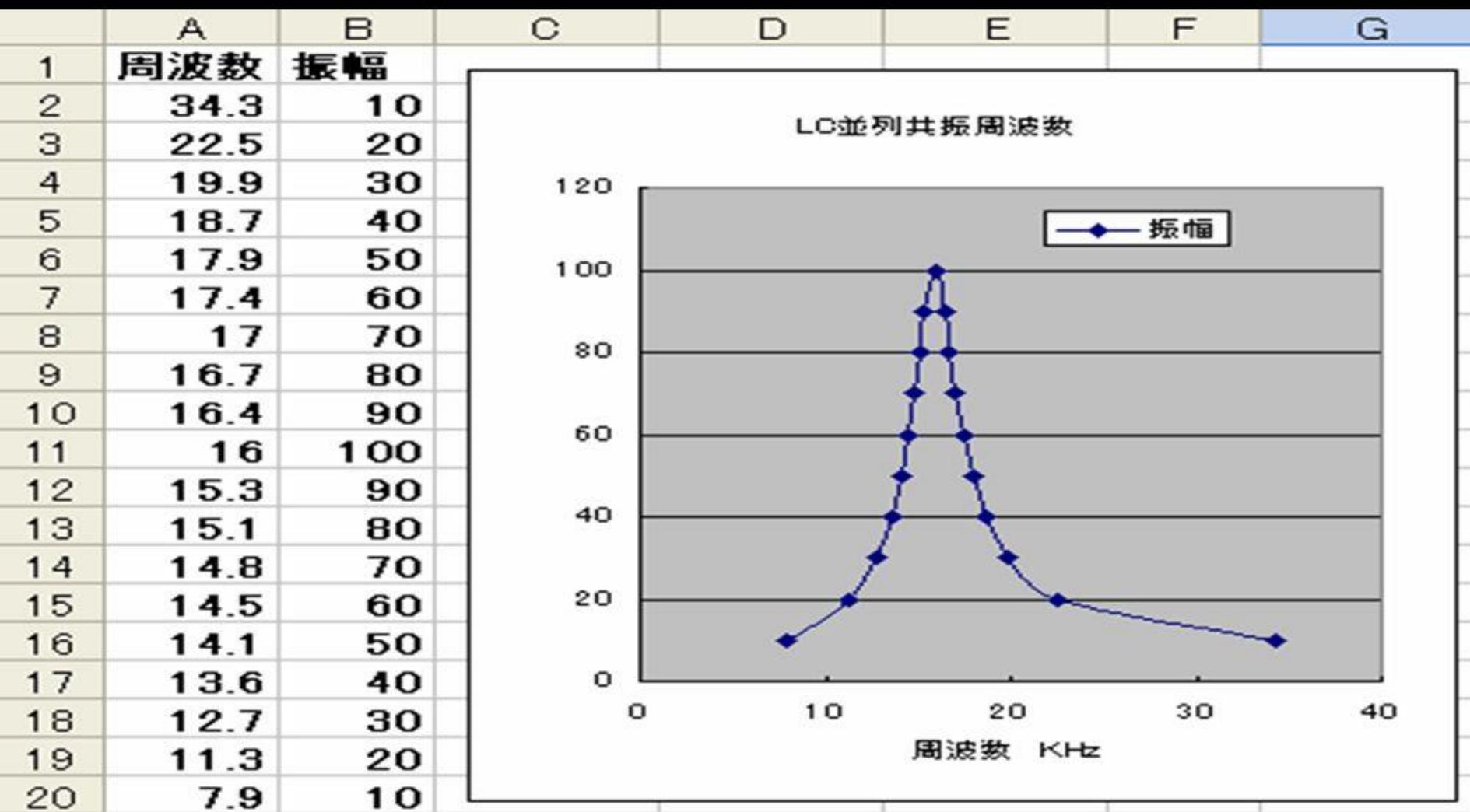
3.6cm (90%)、3.2cm (80%)、2.8cm (70%)、2.4cm (60%)、  
2.0cm (50%)、1.6cm (40%)、1.2cm (30%)、0.8cm (20%)、  
0.4cm (10%)

を示す周波数を記録する。

測定結果を、エクセルでグラフ表示してください。

LC並列回路は、共振周波数でインピーダンスが最大になり、

オームの法則で、電圧も最大になることを理解して下さい。



## ゲルマラジオ

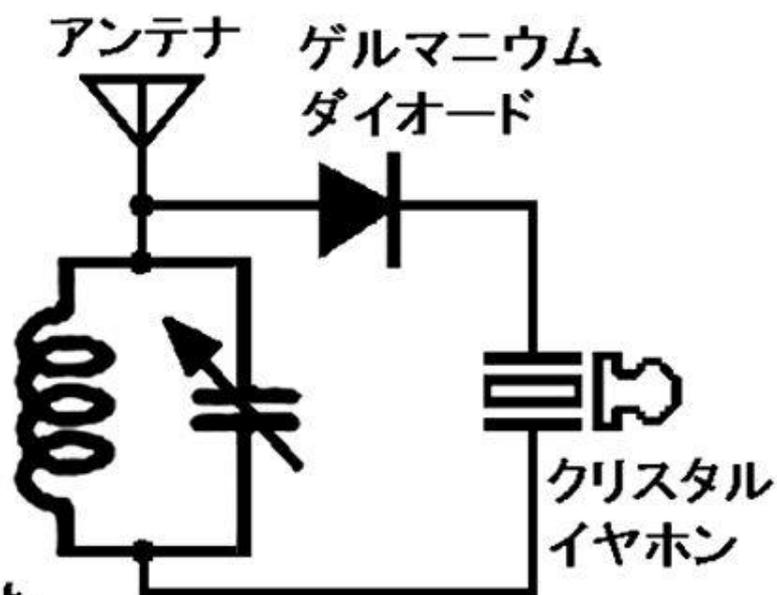
最も基本的なAMラジオの回路。

数十メートルの電線で、アンテナを張る。  
様々な周波数の電磁波がアンテナを  
伝ってLC並列回路に入る。

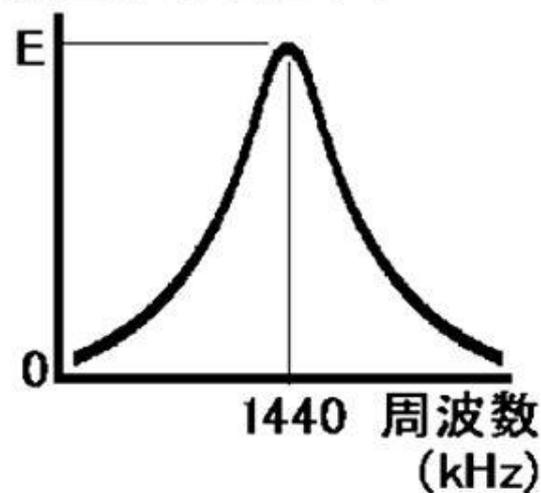
可変コンデンサを調節して、共振周波数が  
1440kHzになればSTVラジオから発信された  
電磁波に比例した電圧が発生する。

LC並列回路の共振周波数に一致する電磁波  
ではインピーダンスが最大になるので、その  
周波数に信号があれば オームの法則で、  
受信信号に比例する電圧を効率よく発生する。

(理論式では共振周波数でインピーダンスは  
無限大になるが、実際にはコイルなどに電気  
抵抗があるので、抵抗を含む回路になり、  
最大インピーダンスは有限の値になる。)

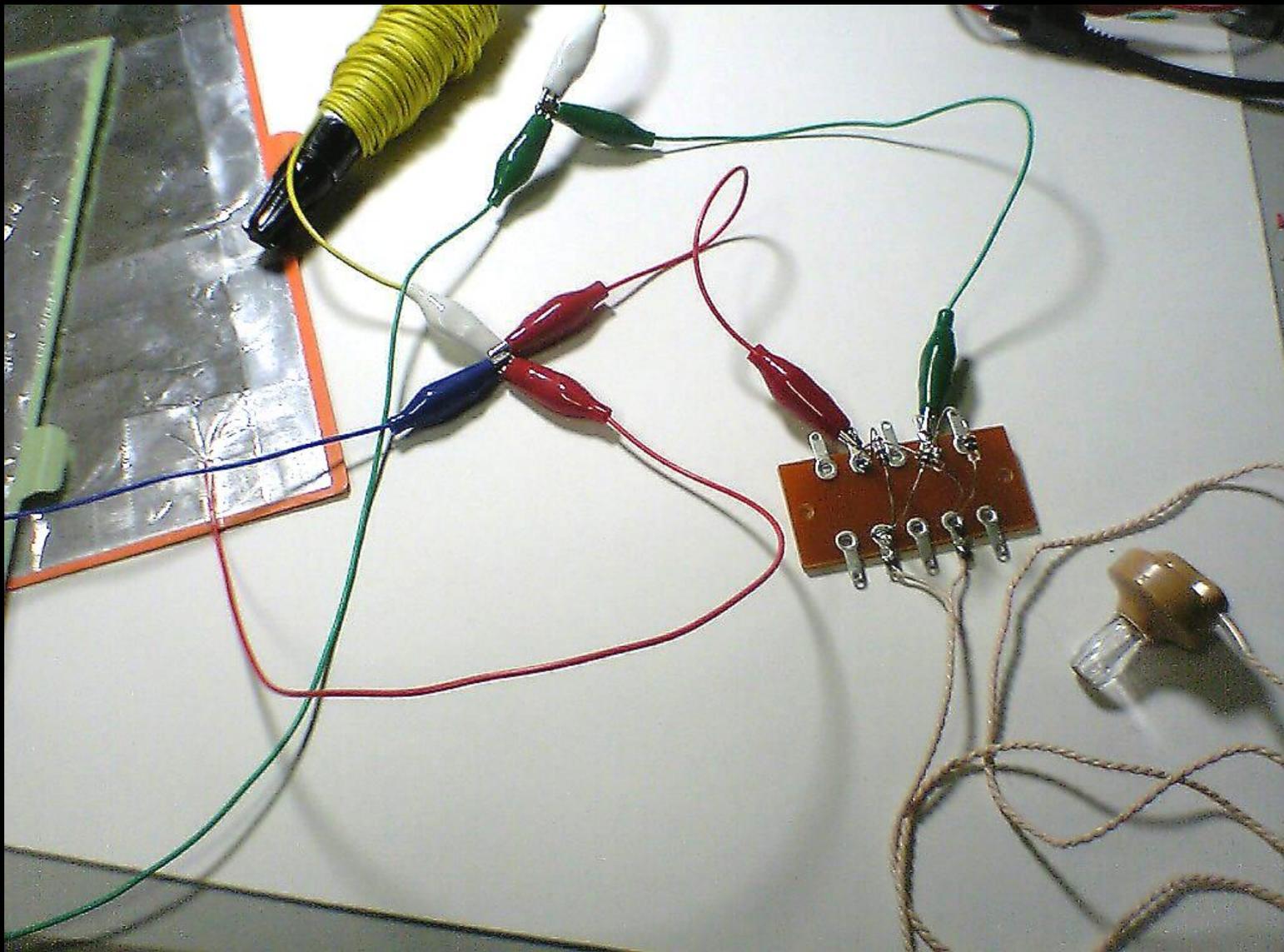


LC並列回路に  
発生する電圧 (V)



# 実験 3 ラジオを作る。

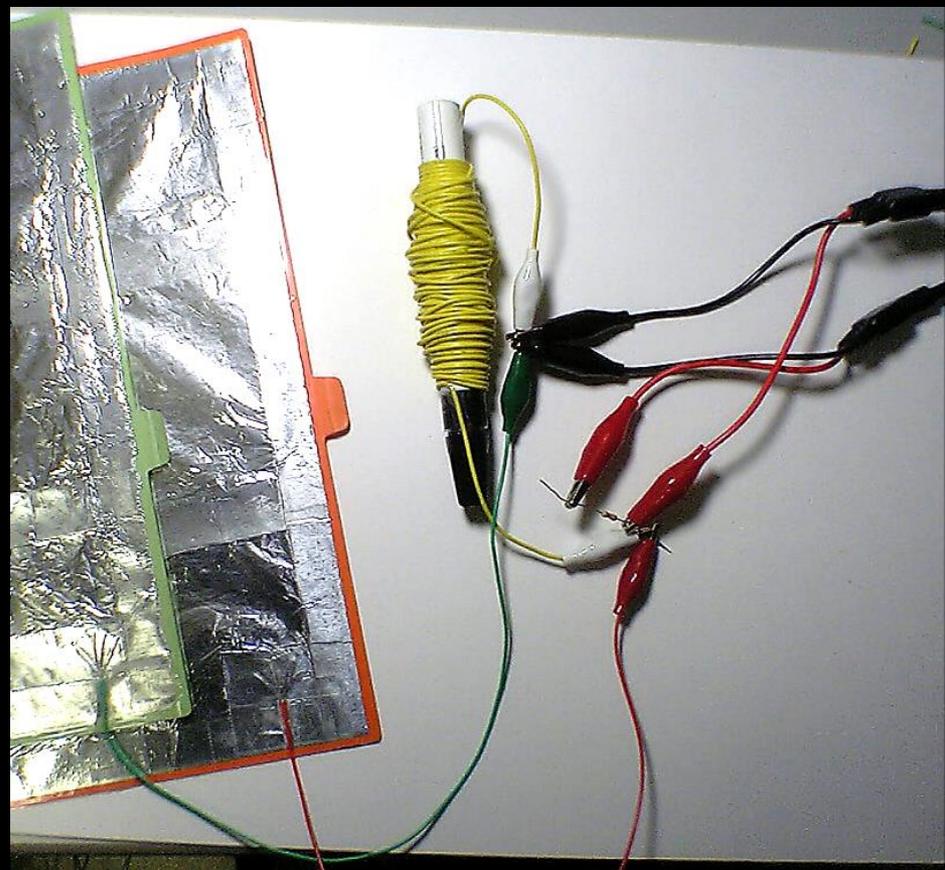
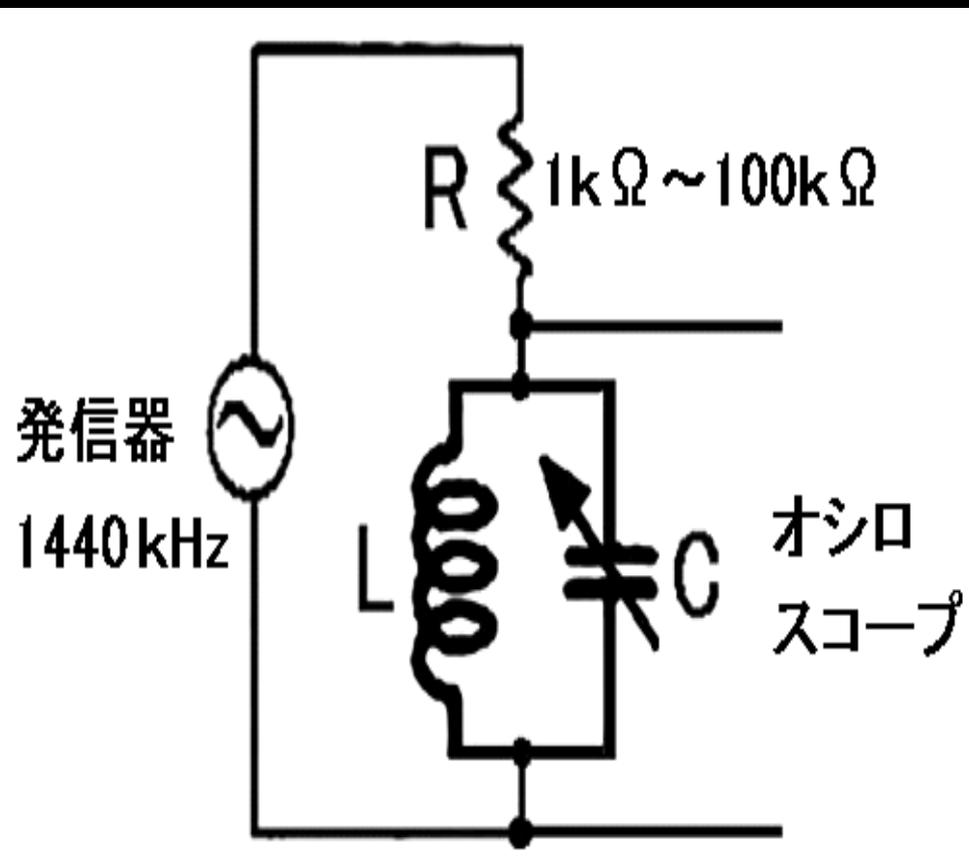
身近な材料で、LC並列同調回路を作成。



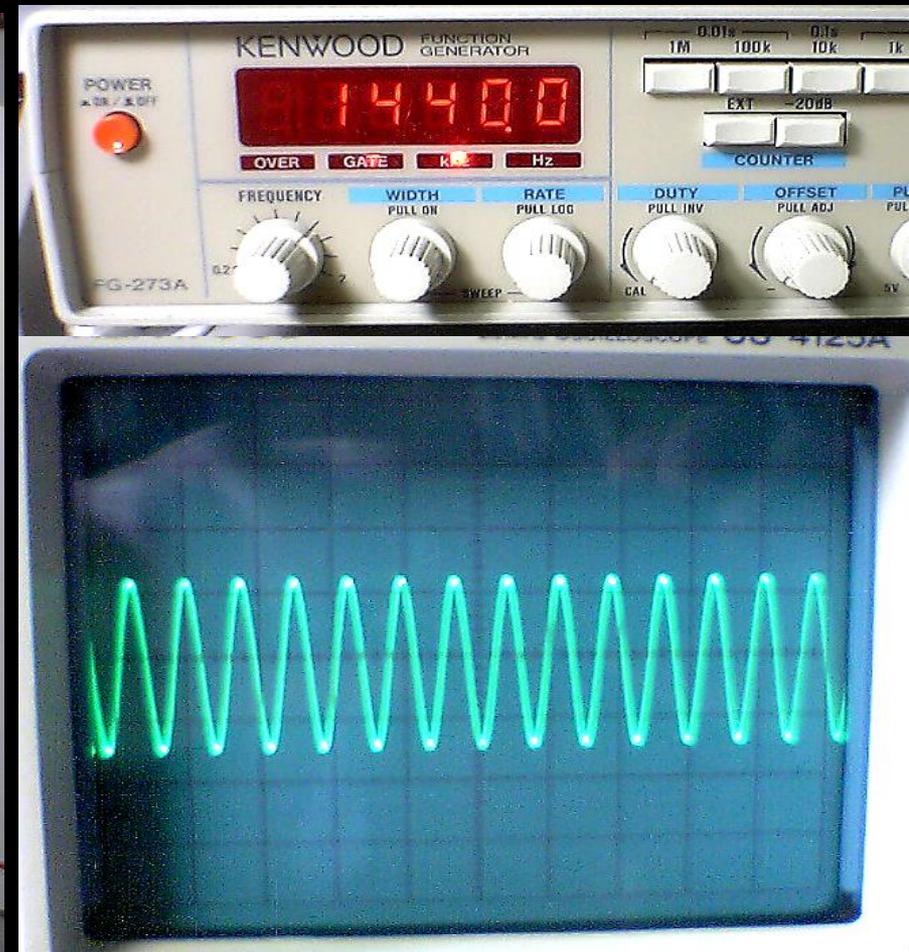
インダクタンスは、マジックペンに導線を10m巻いたもの。

可変コンデンサは、アルミ箔を張った B4厚紙 2枚。

回路図のように、ワニぐちクリップでLC並列共振回路を組む。



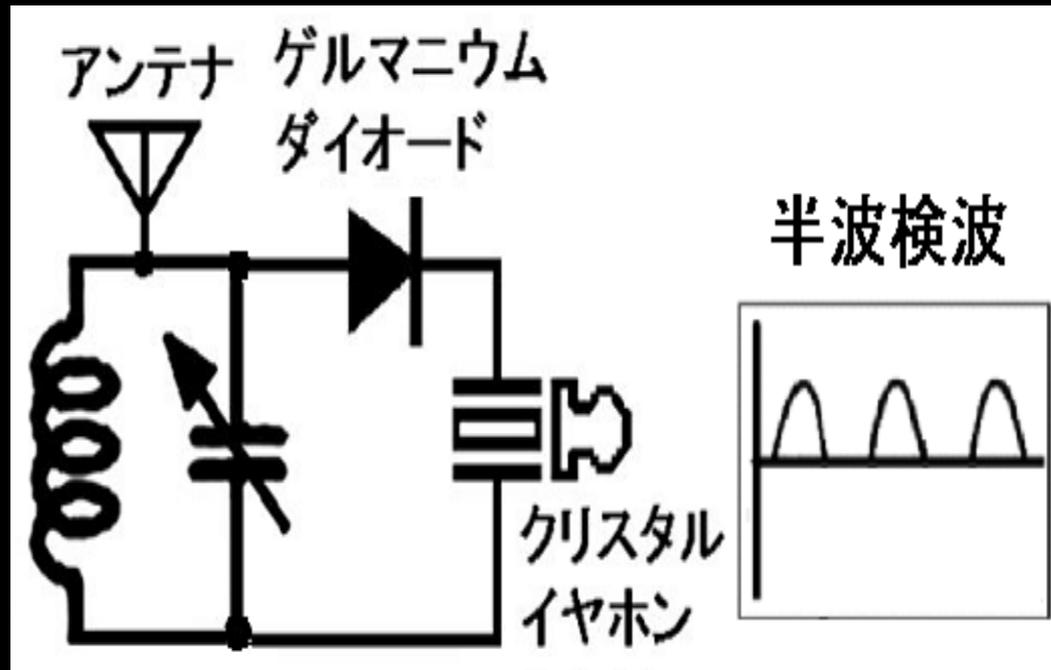
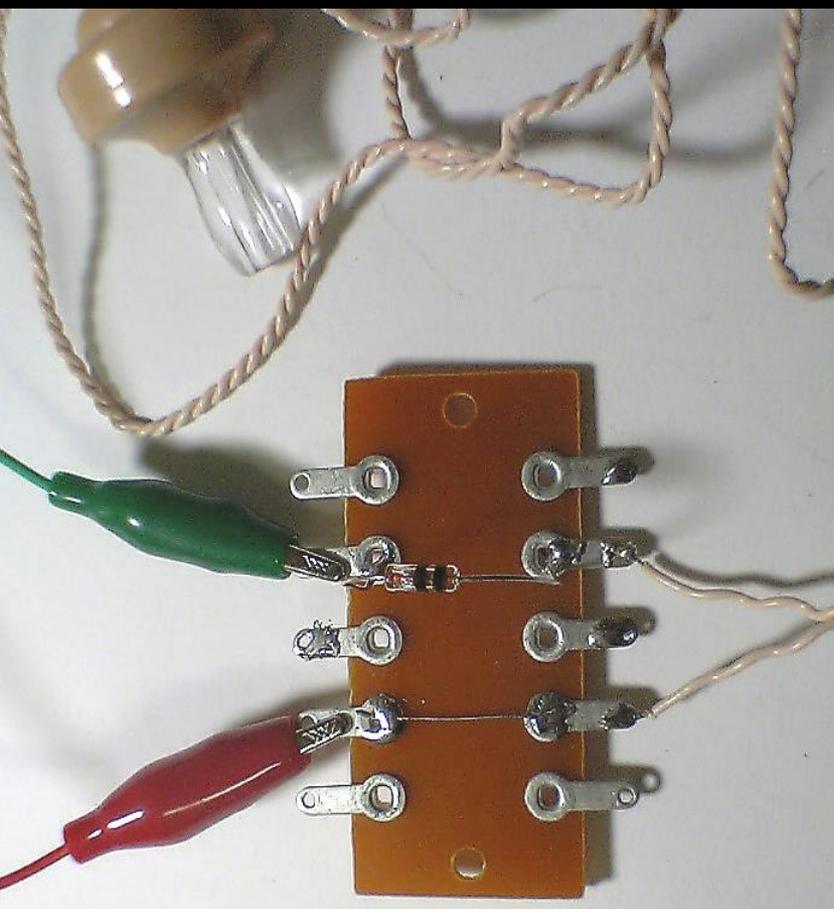
発振器の周波数を、STVと同じ 1440 kHz にする。  
アルミ箔の重なる面積を手で変化させながら、  
オシロスコープの波形振幅が最大になるところがあれば  
この回路でラジオの電波を拾うことができる。



LC並列共振回路に、ダイオードと水晶イヤホンの回路をつなぐ。

アンテナは、10~20m導線を窓際に張る。

または電灯線アンテナをコンセントに差込む

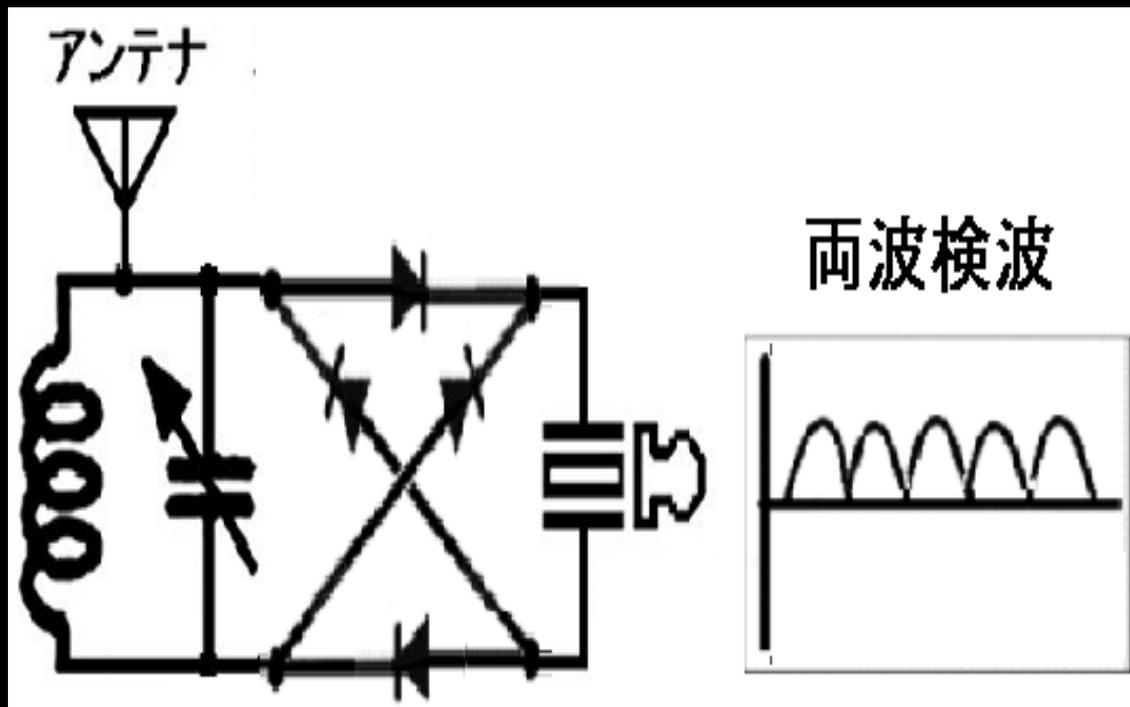
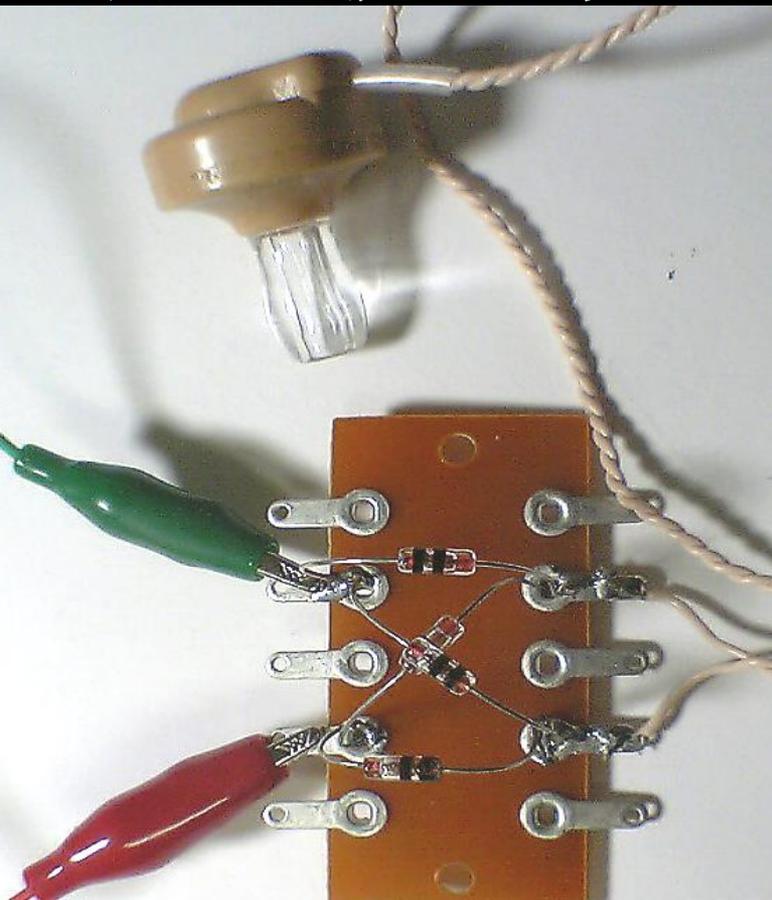


LC並列共振回路に、ブリッジ整流回路、

または半波整流回路ダイオードと

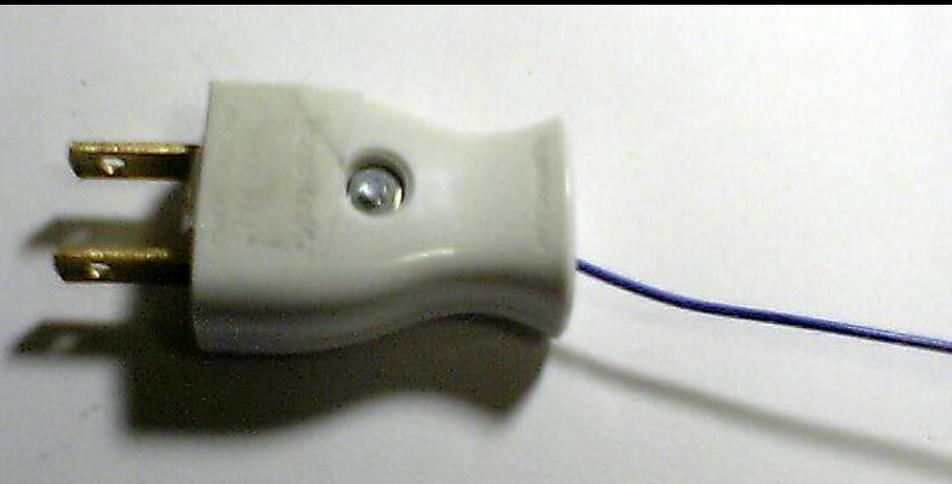
クリスタルイヤホンの回路をつなぐ。

ブリッジ整流のほうがイヤホンへの出力電圧が倍増する。

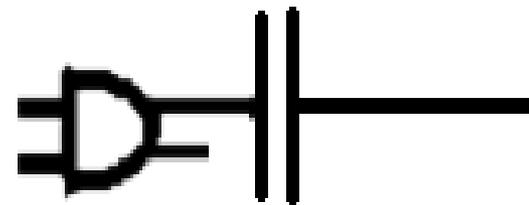


# 電灯線アンテナ

建物の壁の中のAC配線を、アンテナに利用する方法。  
ACプラグの一方だけを利用する。  
コンデンサをつないで商用交流とは絶縁している。  
簡便な方法だが、鉄筋の建物にはあまり有効ではない。



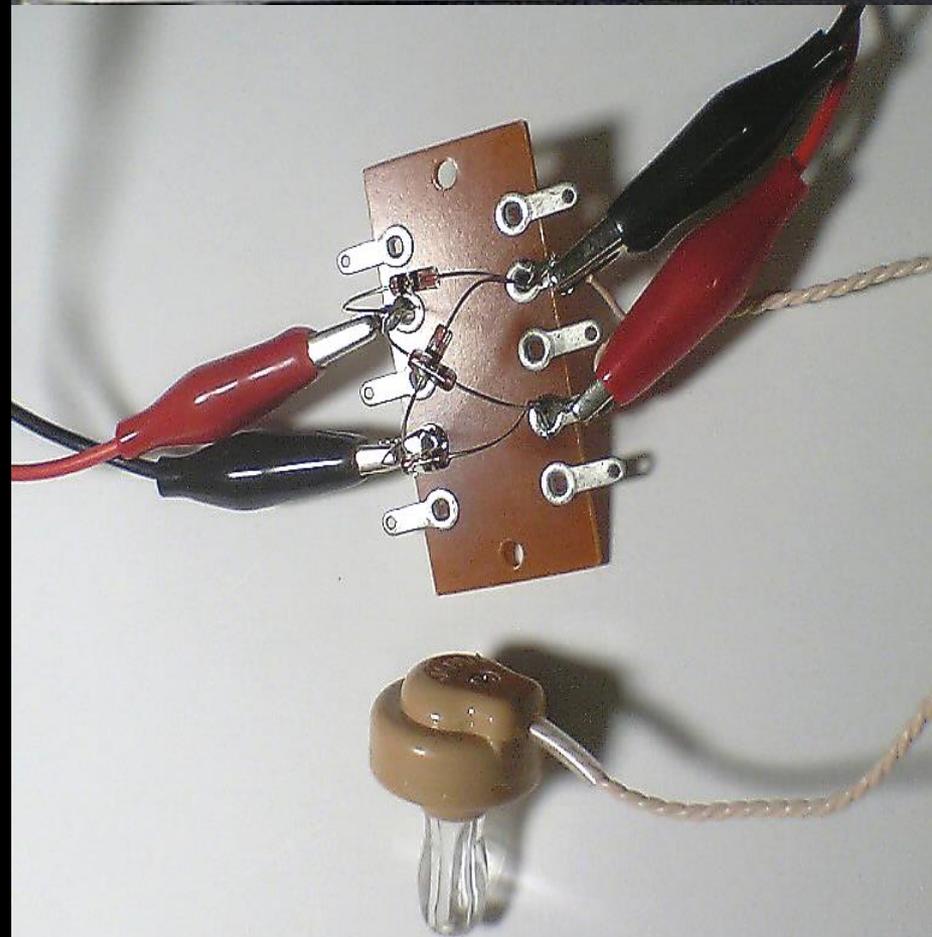
100pF ~ 0.01  $\mu$ F



# 実験4 正弦波の音を聞く

検波回路に、発信器の信号を直接つないで  
発信器の出す交流を  
整流した音を聞く。

発信器の周波数を 50 Hz に  
したときの音を、ハム雑音  
(商用交流雑音、Hum)という。  
古いテレビやラジオでよく聞く  
雑音。



50Hz付近の低周波では、  
全波整流回路から出る音は、半波整流の音より  
周波数が2倍高い（1オクターブ高い）ことを確認して下さい。  
オシロスコープで、イヤホンに入る信号の波形を観察して  
理由を考察して下さい。

発信器の周波数を変化させて、音の変化を確認して下さい。  
このイヤホンは、高い音はあまり出ない。  
聞こえる最高周波数を調べてください。

（振動板が、柔らかいアルミ箔なので、高音の振動が苦手）  
高音の振動が得意な振動板は、軽くて硬いチタン箔で、  
超音波も出せるので、エコーの探触子に利用される。