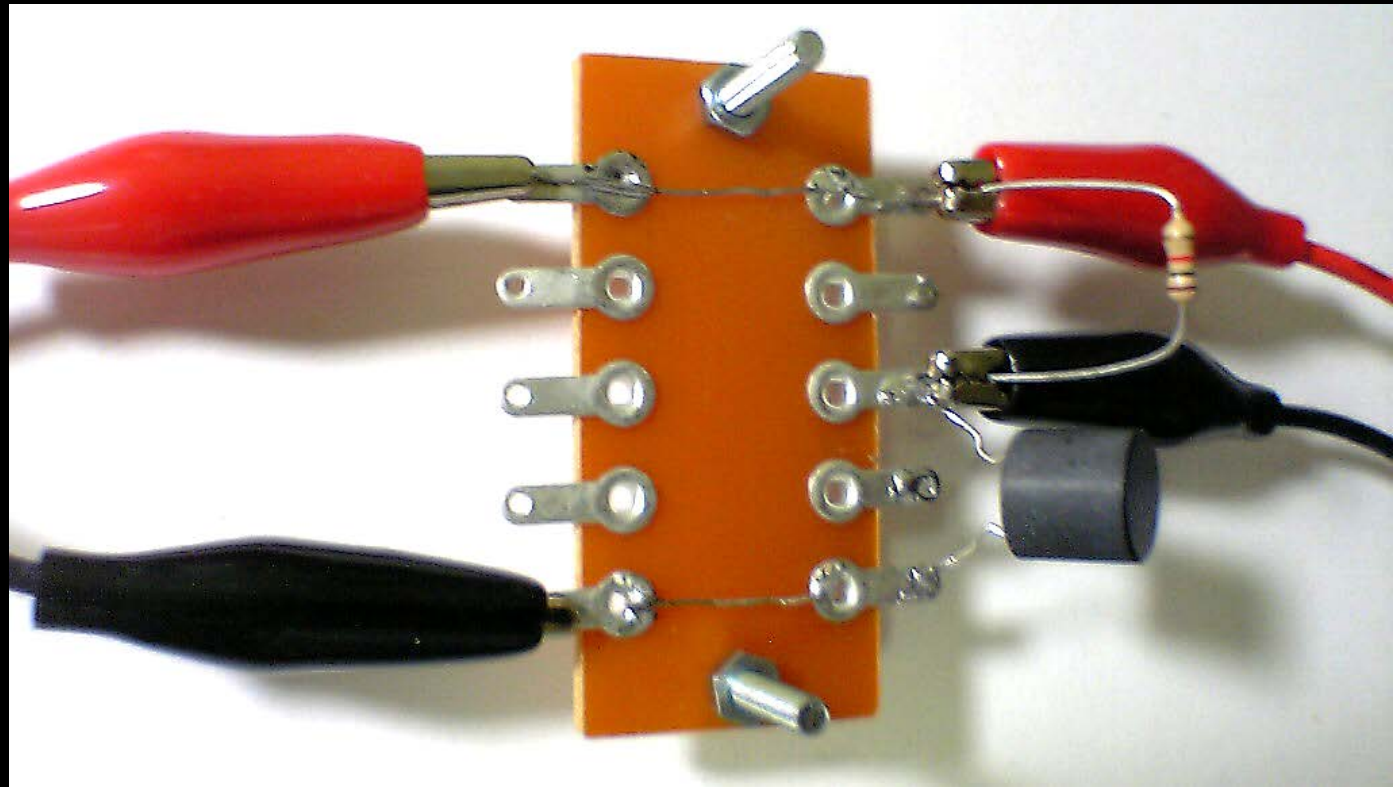
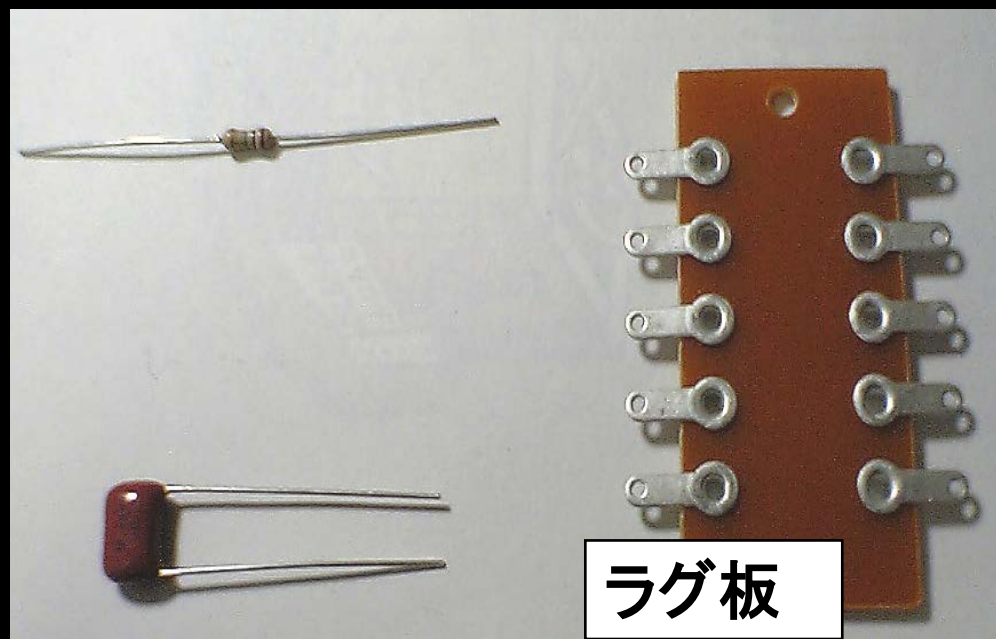


LR結合回路の実験

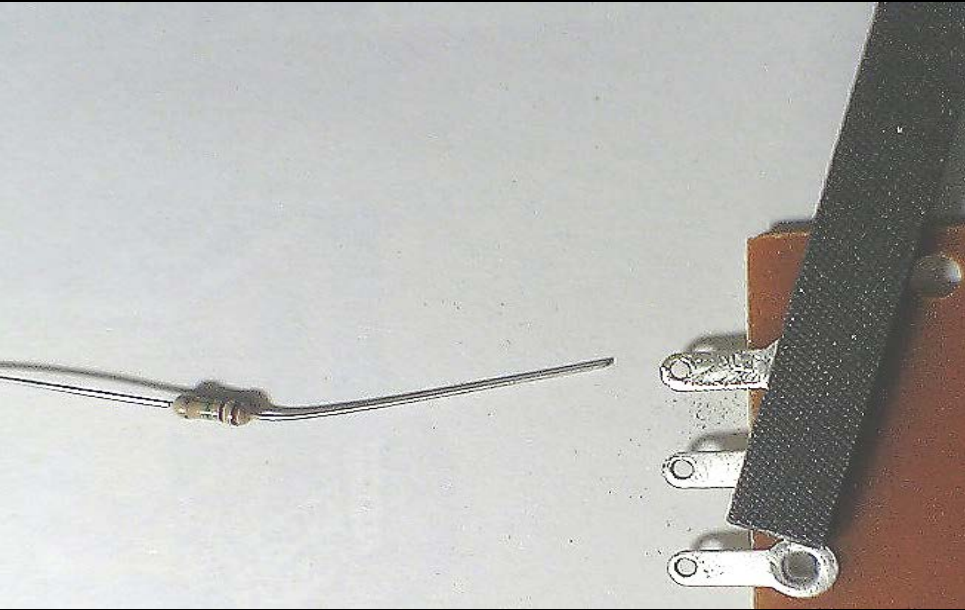
インダクタンス L と抵抗 R を、
直列接続した回路の周波数特性を、
発振器とオシロスコープを用いて観察し、理解する。



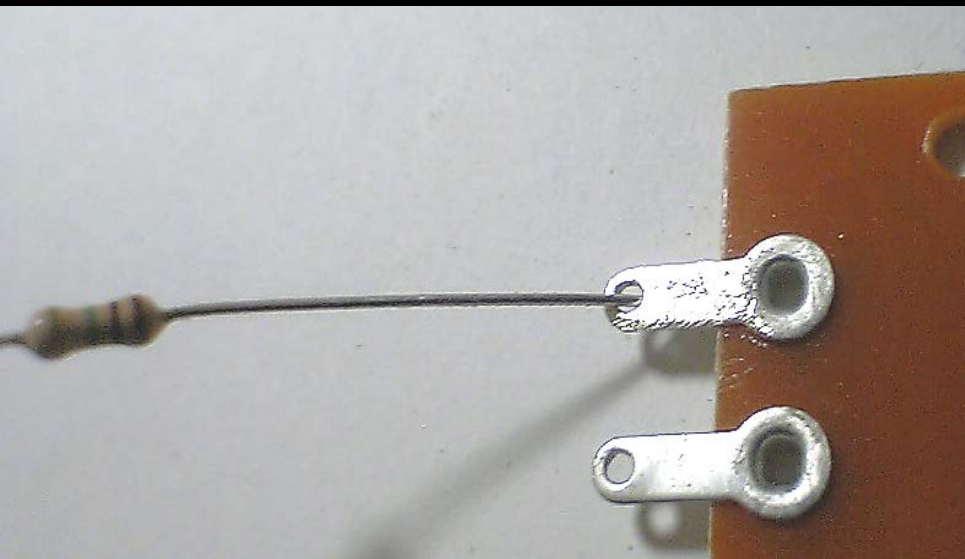
ハンダ付け Solder スズと鉛の合金。融点 400°C
ハンダごてでハンダを溶かして、電子部品を接合する。
こて先は、数百度の高温なので、火傷しないように注意。
机の上に溶けたハンダが落ちるといけないので、
必ず厚紙等を敷いた上で、ハンダ付け作業をしてください。
ラグ板に、抵抗とインダクタンスの直列回路を組む。



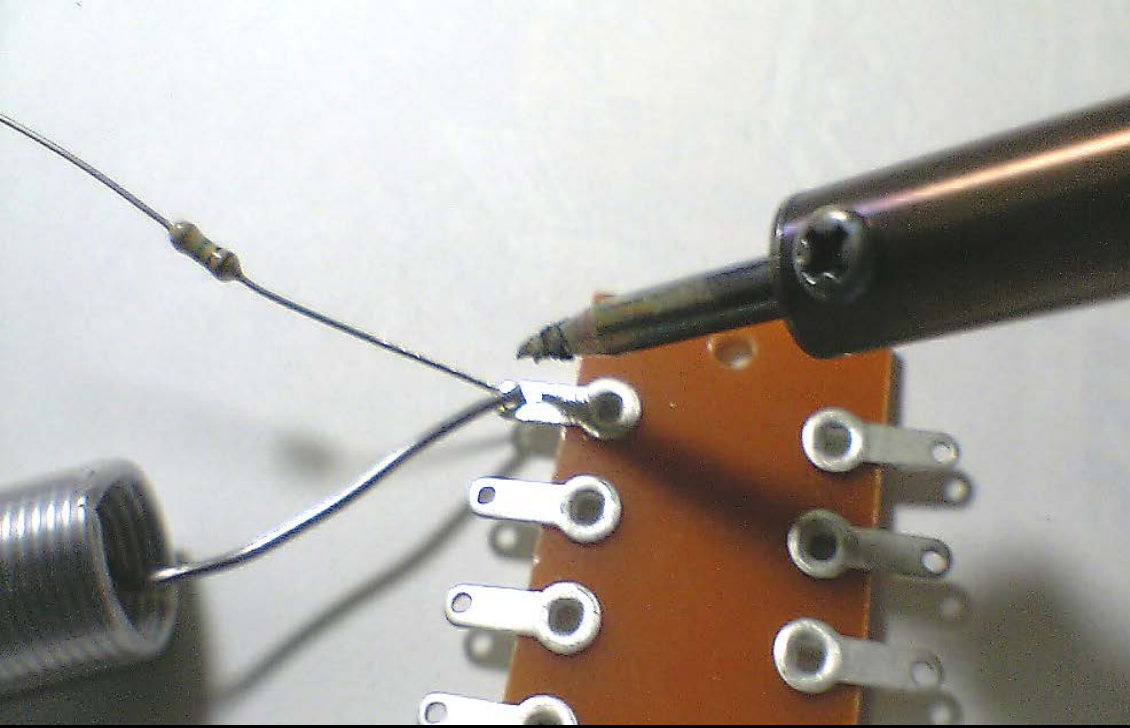
数種類の抵抗器とインダクタンスが用意してあるので、各自、1個ずつ選択し、ラグ板にLR結合回路を組む。



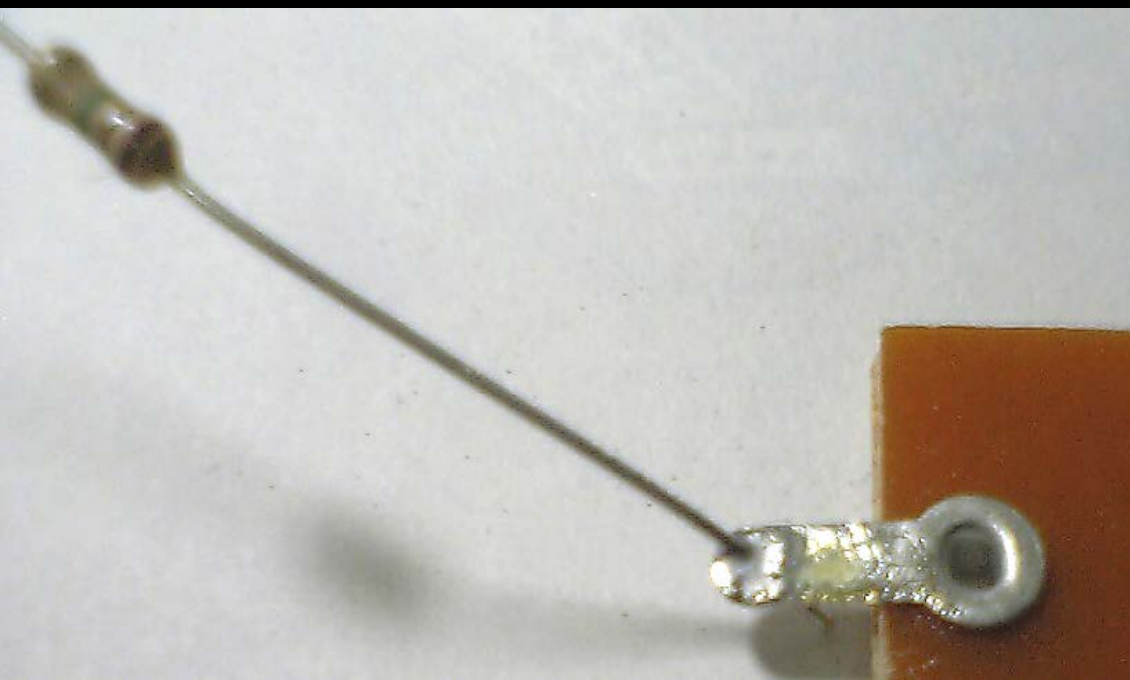
ハンダをつける場所に やすりをかけると、皮脂の除去とざらつき（表面積）増加の効果で、ハンダが付き易くなる。



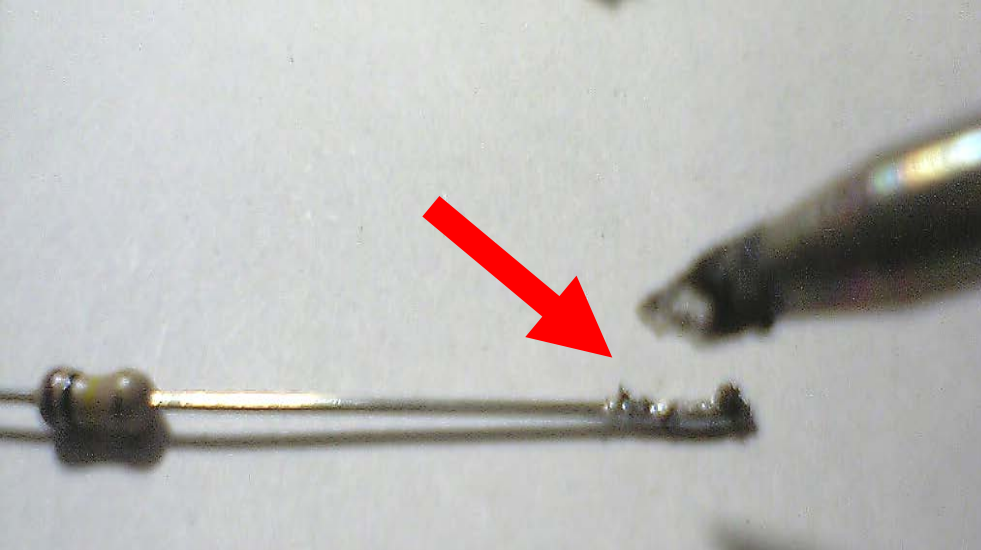
接合したい電子素子の端子をラグ板の足に固定。



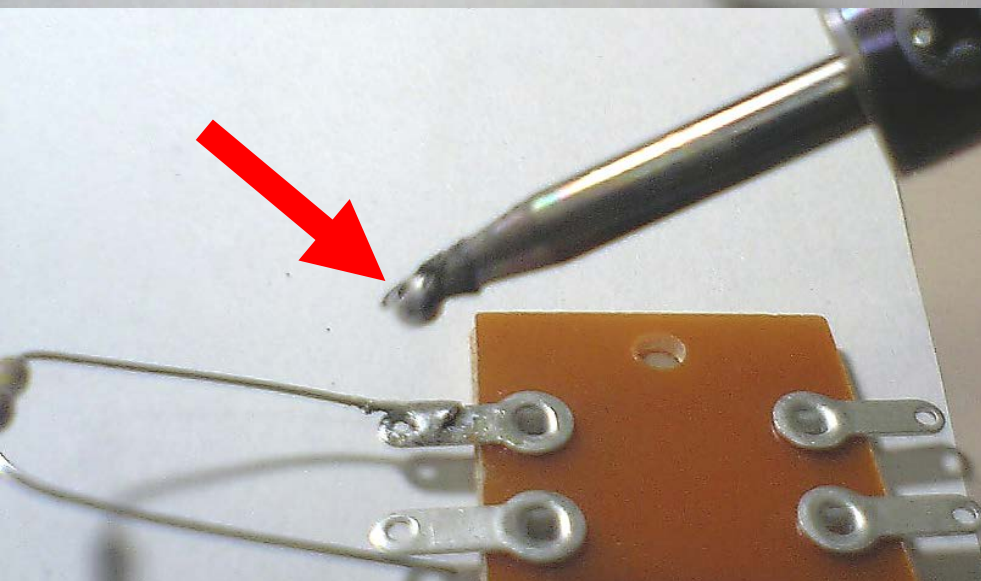
ハンダをあてながら、
ハンダが溶けるまで
上からはんだごてをあてる。



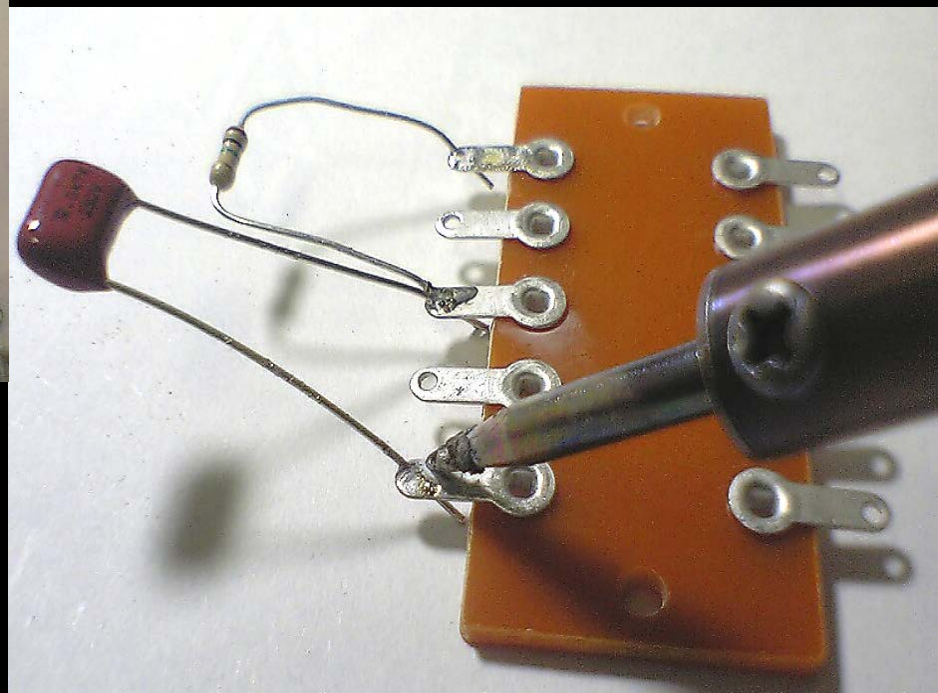
ハンダが溶けるたら、
ハンダごてを離す。
ハンダが固まるまで
数秒間、電子素子を動かさ
ないように注意する。



あらかじめ、電子素子の端子に
ハンダを溶かして塗るように
付けたり（ハンダめっき）、
あらかじめ、ハンダこて先に
半田を少し付けて作業を行うと
楽にハンダ付けができる。



ラグ板上に、LR結合回路を完成
させてください。



インダクタンス (コイル) (1個 60円)

表示の読み方



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

K は 誤差 $\pm 10\%$ を示す



底面からコイルが見える



これもインダクタンス

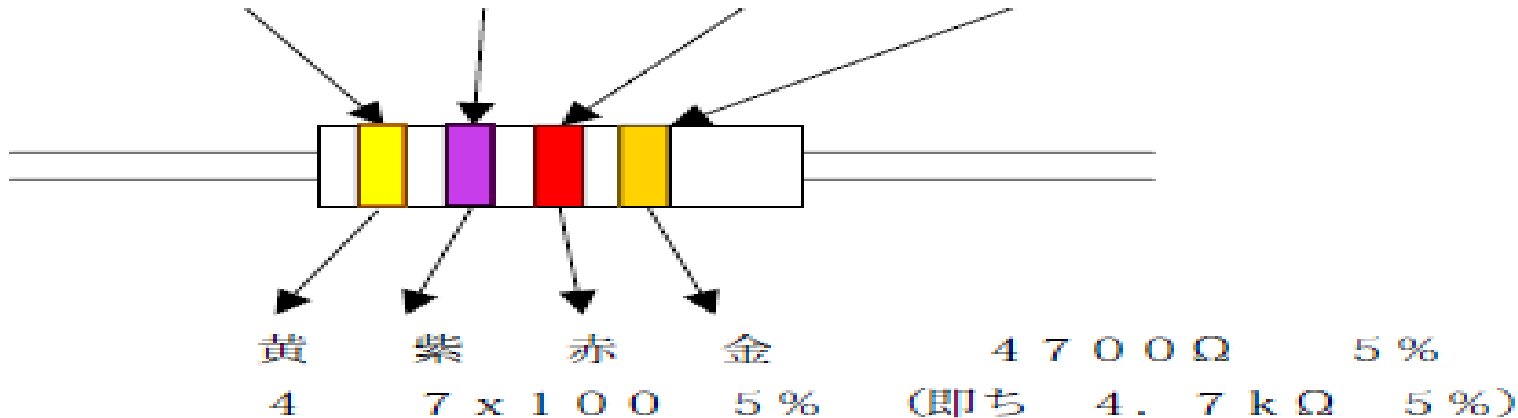
102 = 1mH



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	± 2
	茶	1	1	10	
	赤	2	2	10 ²	
	橙	3	3	10 ³	
	黄	4	4	10 ⁴	
	緑	5	5	10 ⁵	
	青	6	6	10 ⁶	
	紫	7	7	10 ⁷	
	灰	8	8	10 ⁸	
	白	9	9	10 ⁹	
	金			10 ⁻¹ (0.1)	± 5
	銀			10 ⁻² (0.01)	± 10
	無着色				± 20



数種類の抵抗器とインダクタンス(コイル)が用意してあるので、各自、1個ずつ選択し、ラグ板にCR結合回路を組む。

まず、選んだ抵抗とインダクタンスの値から
LR結合回路の遮断周波数を計算する。

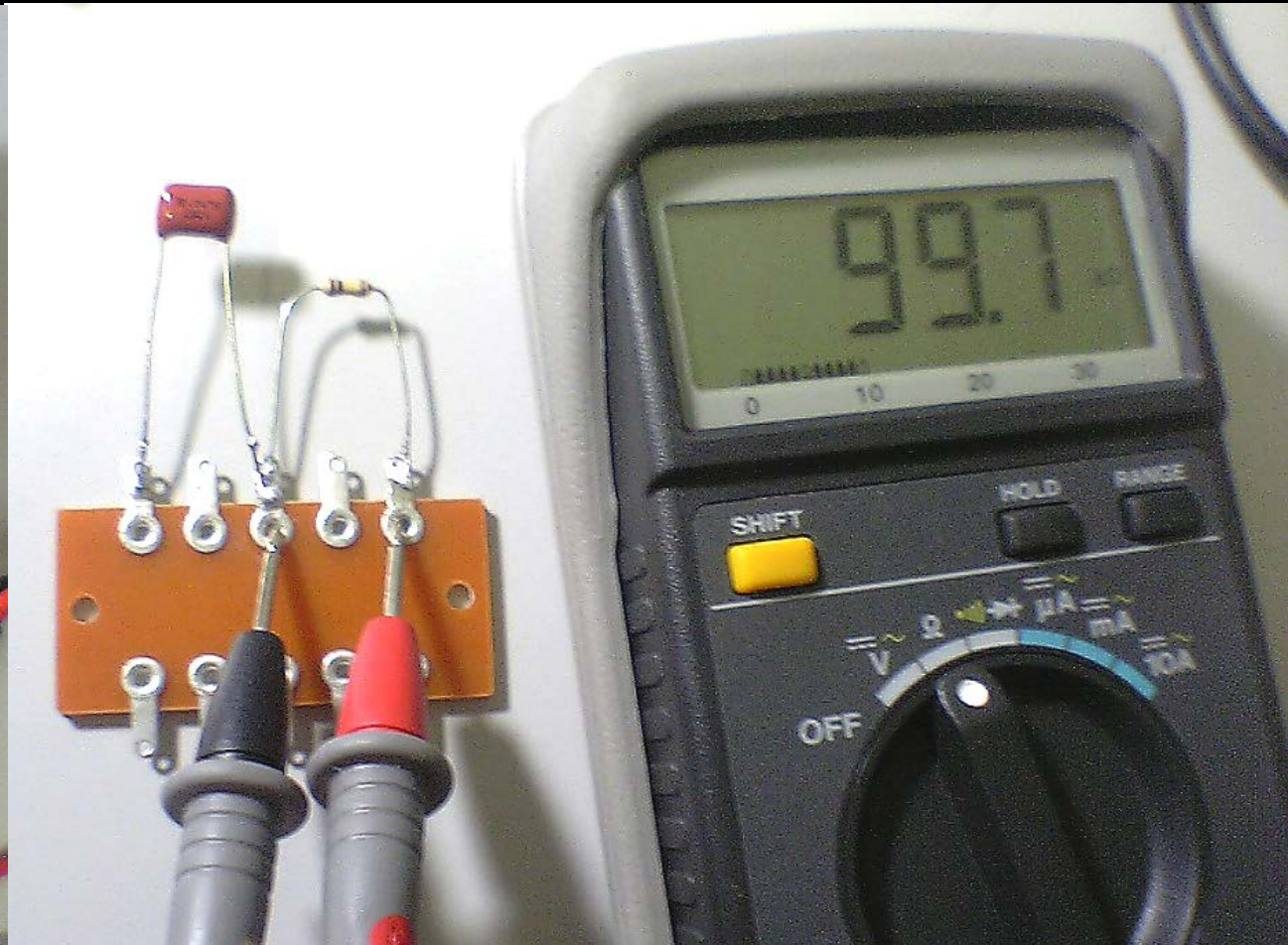
測定器の性能上、LR結合回路の遮断周波数

$$f = 1 / (2 \pi \tau) \quad \text{時定数 } \tau = L / R$$

L:ヘンリー(H) R:オーム(Ω)

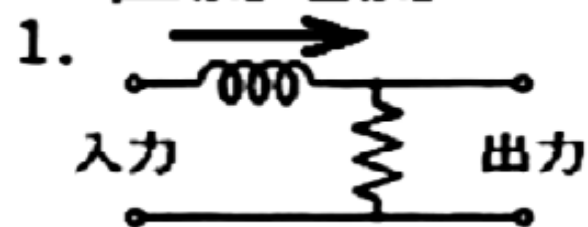
fの値が、30 Hz 以上、1000000 Hz (1 MHz) 以下になるように、抵抗とインダクタンスを選んで下さい。

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。
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 Ω にして、抵抗両端の抵抗値を測る。

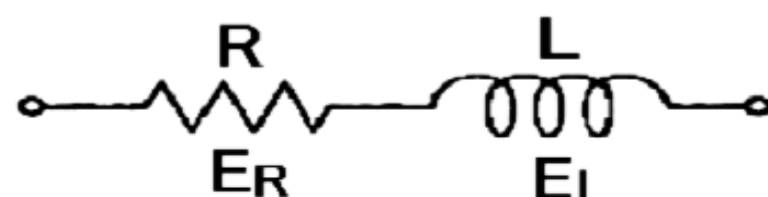


直流電流 I

コイルは直流をよく通すので、抵抗には電圧が生じる。低域遮断フィルタではない。これを確認しよう。



LR 直列回路



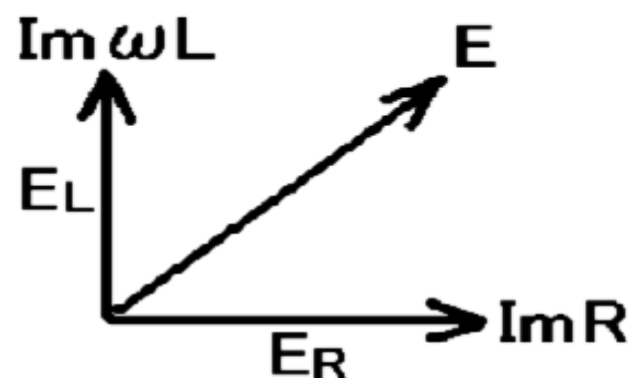
直列なので、 R と L に同じ電流 I が流れる。

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

$$E_R = IR = I_m R \sin(\omega t)$$

$$E_L = I\omega L = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ)$$

コイルに生じる電圧の位相は、電流より 90° 進んでいる。



$$E = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \text{インピーダンス } Z \text{ は、} \omega \text{ と比例する。}$$

LR 結合回路に交流電圧 E を入力したときの
出力電圧 E_R を求める。

入力電圧 $E = E_m \sin(\omega t)$

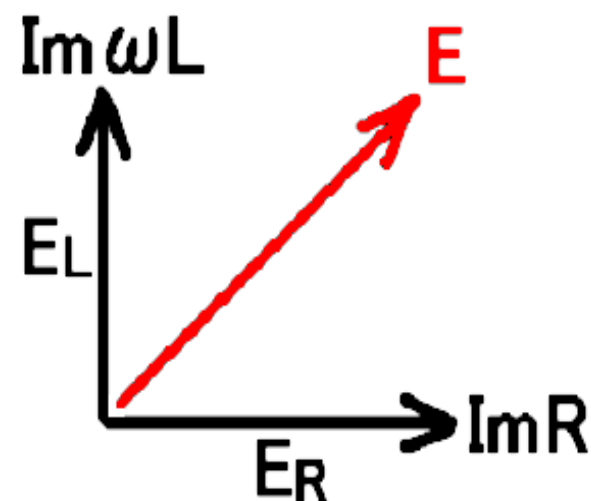
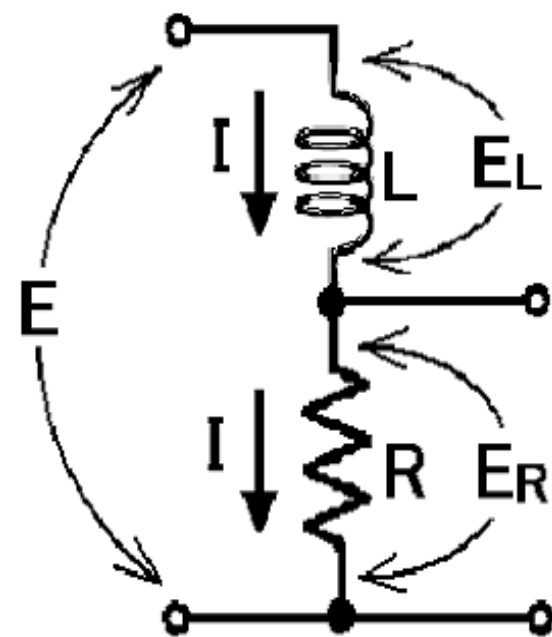
抵抗 R に流れる電流 I は、 $I = E / Z$

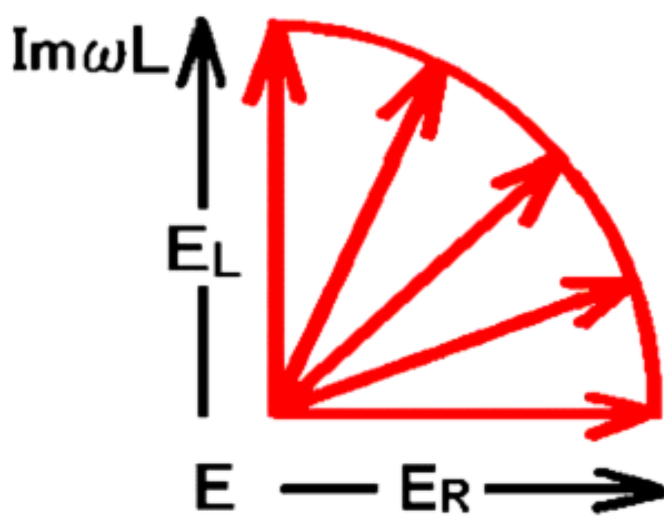
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \text{ を代入して } I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

出力電圧 E_R は、

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

E_L と E_R が、同じ値になる 入力電圧の周波数では、
出力電圧 E_R は、入力電圧 E の $1/\sqrt{2}$ 倍になる。





$$E = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

入力交流電圧 E の大きさは一定だが、
入力交流電圧の周波数が変化すると
 E の向き(位相、位相角)が変化して、
 E_R と E_L の大きさが変化する。

周波数が低いと E_L が小さくなり、 E_R が大きくなる。

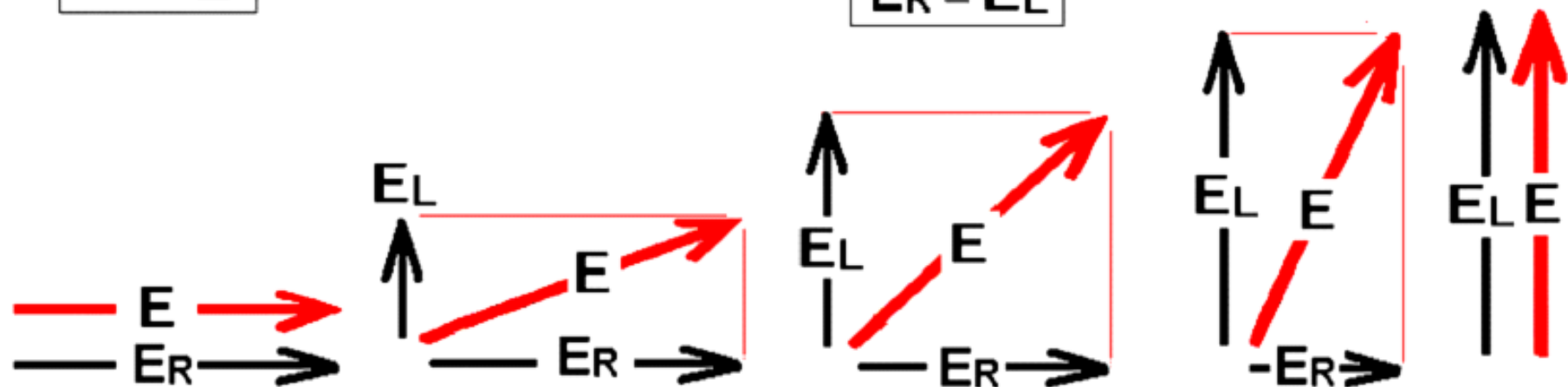
周波数が高いと E_L が大きくなり、 E_R が小さくなる。

低 ← 入力周波数 → 高

$$\begin{aligned} \omega &= 0 \\ E_L &= 0 \\ E_R &= E \end{aligned}$$

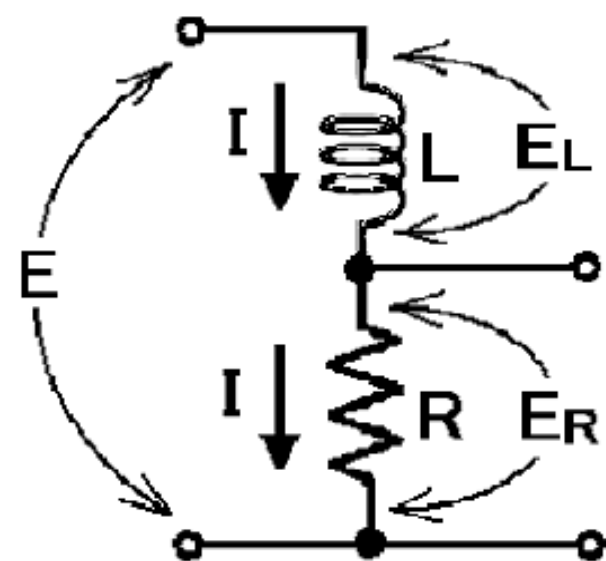
$$\begin{aligned} \omega &= \frac{R}{L} \\ E_R &= E_L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= \infty \\ E_R &= 0 \\ E &= E_L \end{aligned}$$



入力Eの周波数が $f = 0$ (直流)のときは、コイルLのインピーダンスは、ほとんど0なので、出力電圧 E_R は入力と同じになる。

入力Eの周波数が極めて高いときは、コイルLに電流が通らないので出力電圧 E_R は0。



したがって、LR結合回路の抵抗の電圧 E_R は、入力信号の高周波成分を遮断する機能をもつ。(高域フィルタ、高周波フィルタ)

ある周波数から急に通り難くなる周波数を、遮断周波数という。

E_L と E_R が同じ大きさになって、出力 E_R が入力の $1/\sqrt{2}$ 倍になる周波数 f_H をLR結合回路の高域遮断周波数(High cut-off frequency)という。

$E_R = I_m R$ 、 $E_L = I_m \omega L$ なので、 $E_L = E_R$ となるときは、 $\omega = \frac{R}{L}$

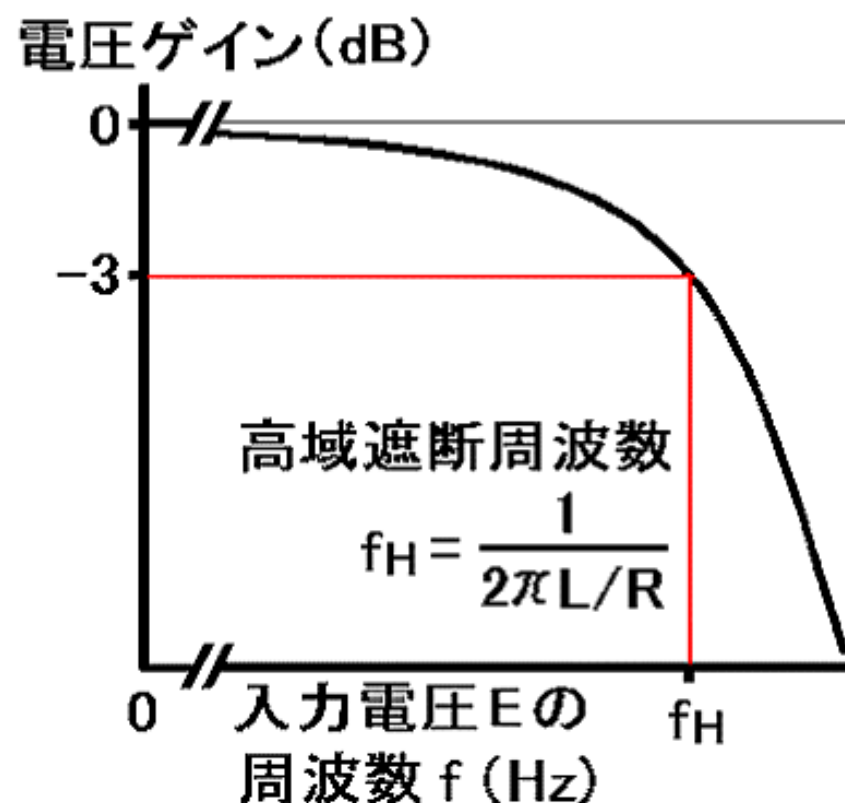
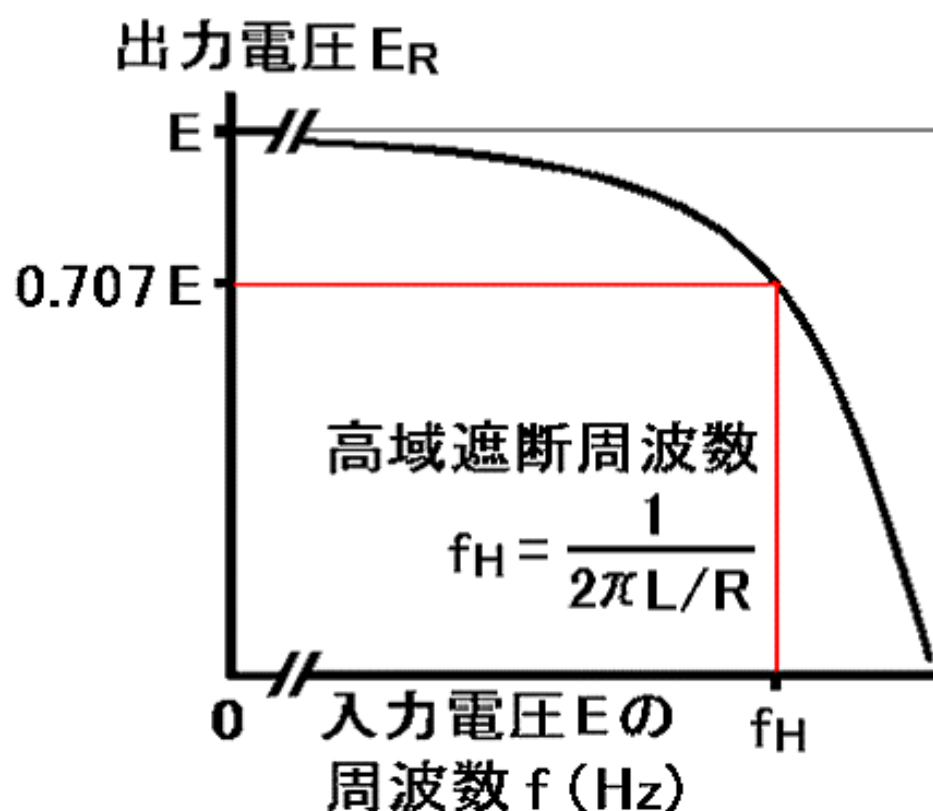
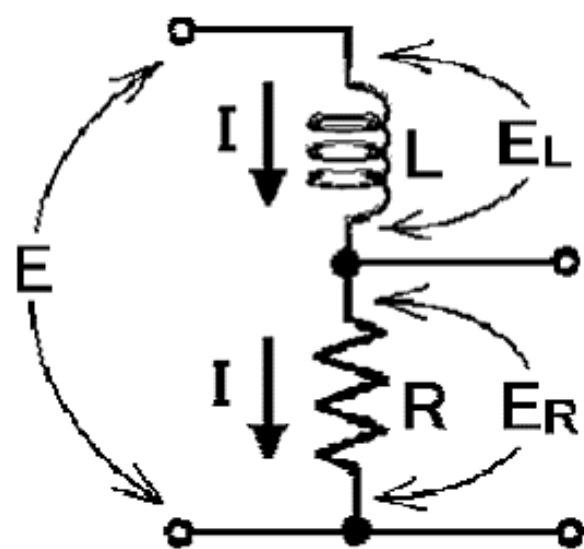
高域遮断周波数 $f_H = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi L/R} = \frac{1}{2\pi \tau}$

LR回路の時定数 τ は
 $\tau = L/R$ (sec)

LR結合回路の抵抗電圧 E_R は、
 入力信号の高周波成分を遮断する機能をもつ。
 (高域フィルタ、高周波フィルタ)

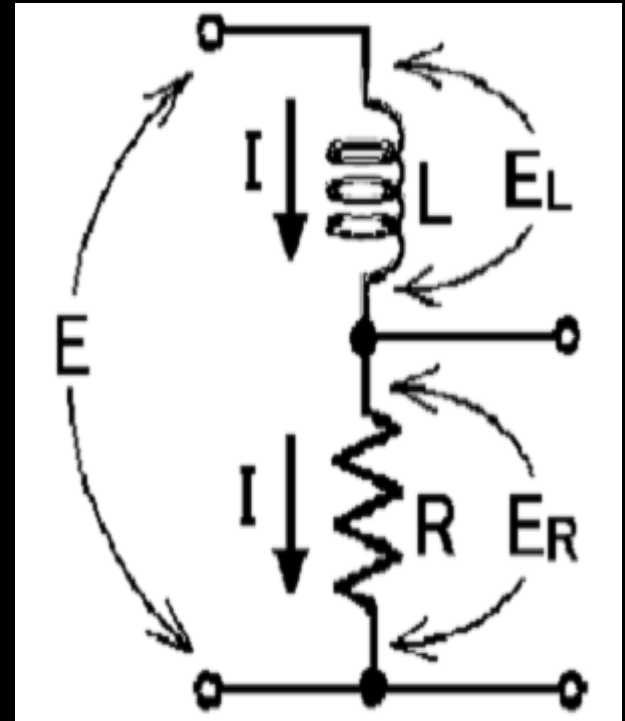
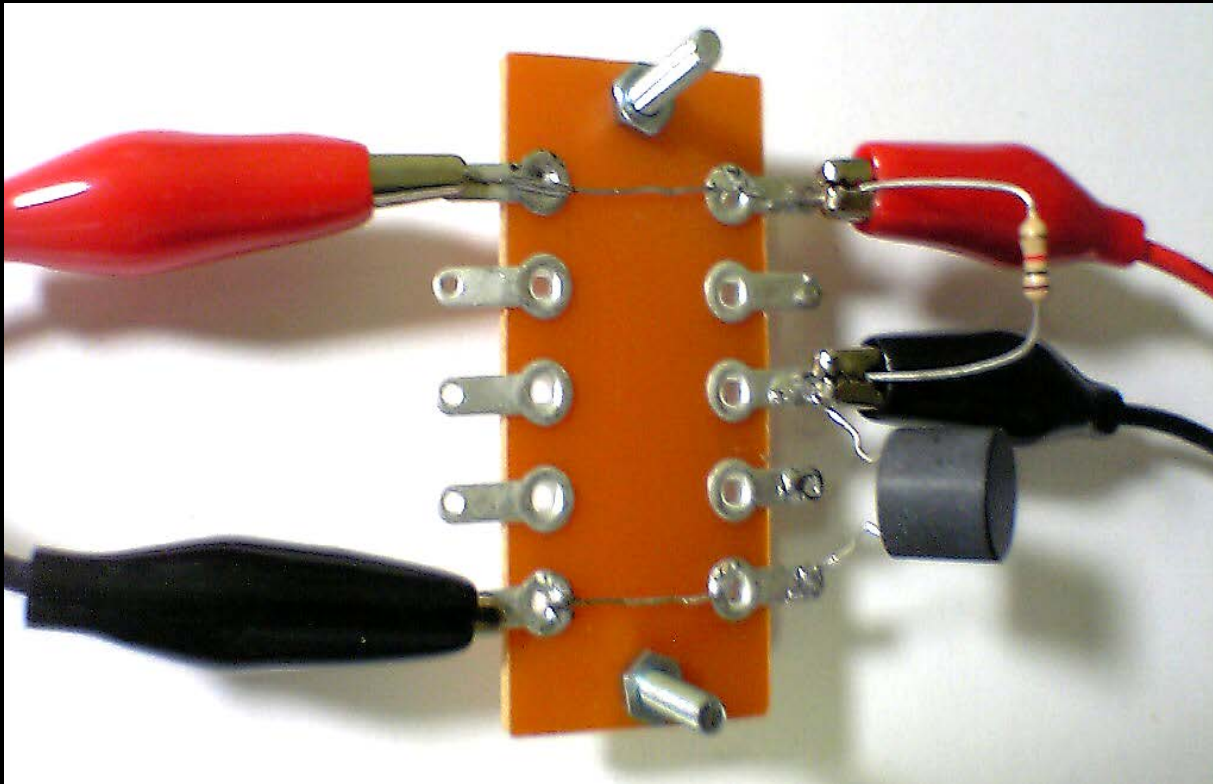
$$\text{高域遮断周波数 } f_H = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi L/R} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

(High cut-off frequency) ($\tau = L/R$)



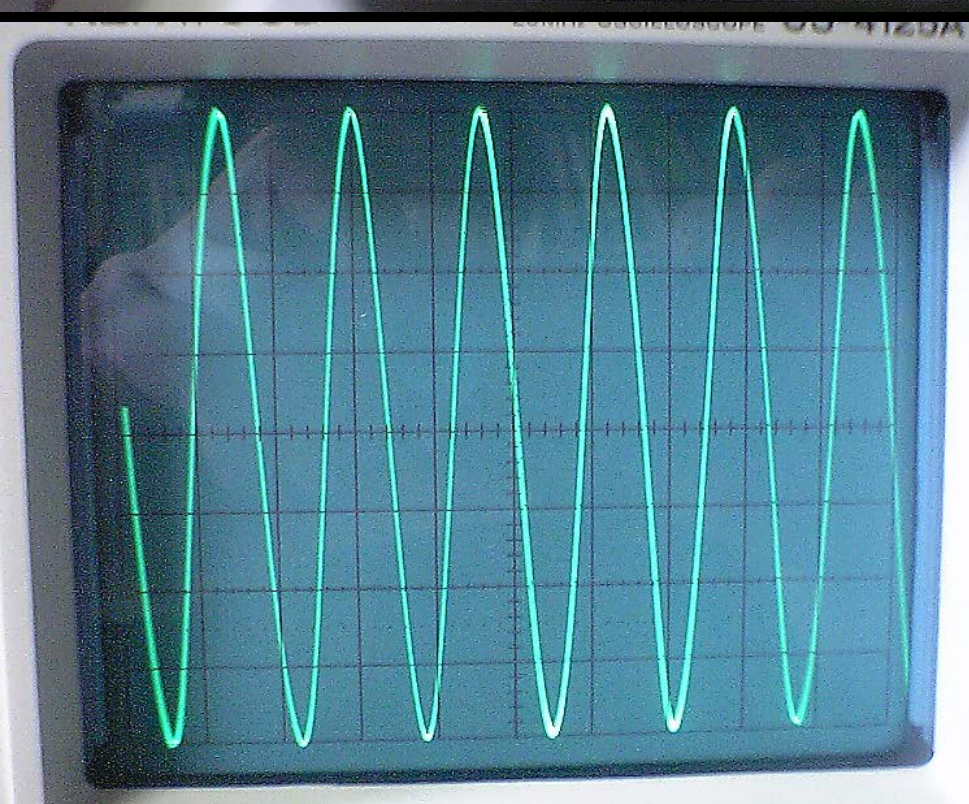
実験 1 LR結合回路の 抵抗電圧

発振器の出力を、LR結合回路の両端につなぐ。
抵抗両端の電圧を、オシロスコープの CH1 につなぐ。



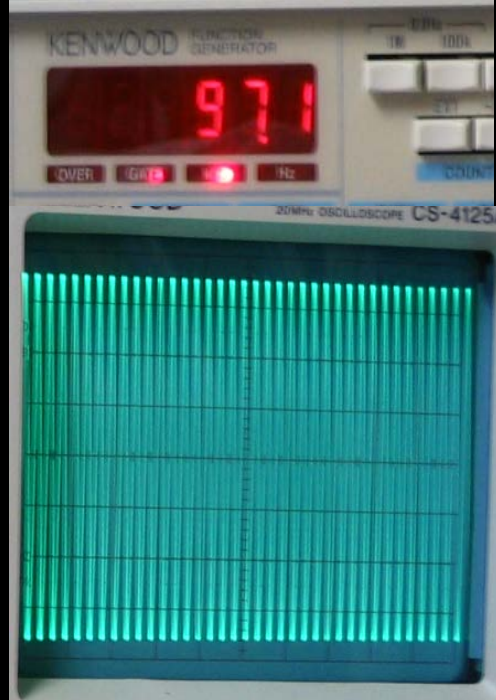


10 Hz 以上の周波数で、
抵抗電圧が最大になる
周波数を探してください。

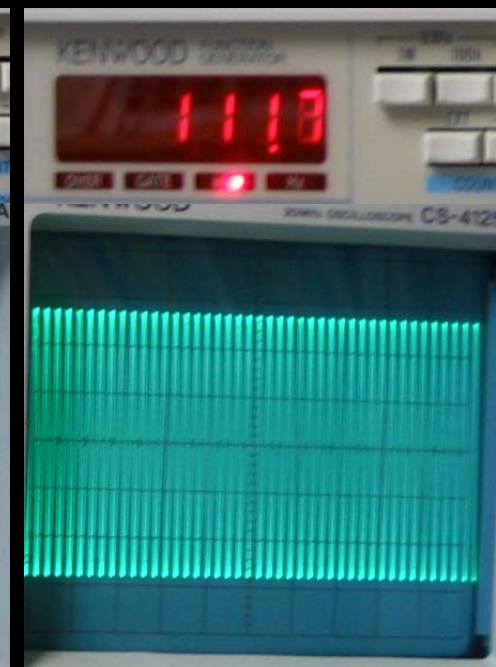


(10Hz以下では、ケーブル自体
が持つ抵抗と静電容量で電圧が
下がる。)

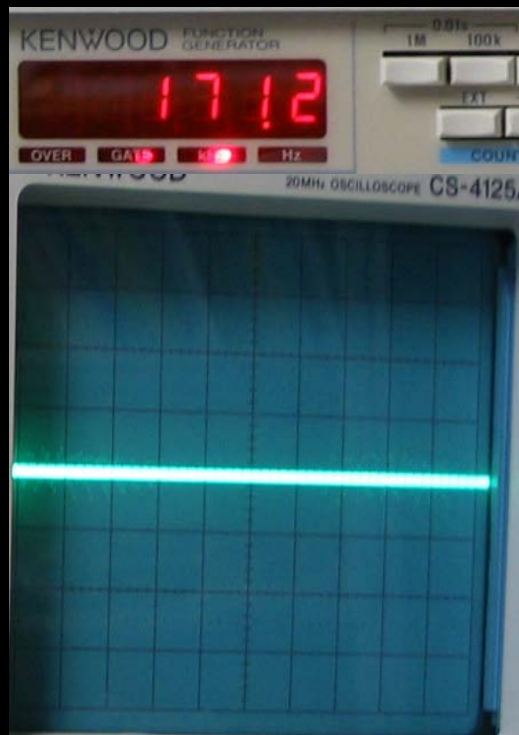
最大電圧を示す周波数で、
振幅が 4cm になるように調整。



最大の振幅を示す周波数から
次第に周波数を上げ、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%)、 0cm (0%)
を示す周波数を記録する。



振幅が最小になる周波数から
周波数をさらに上げると
逆に振幅が少し増加する。
これは、ケーブルが静電容量を
持つため電氣的にコンデンサに
なってLCR共振回路になるため。

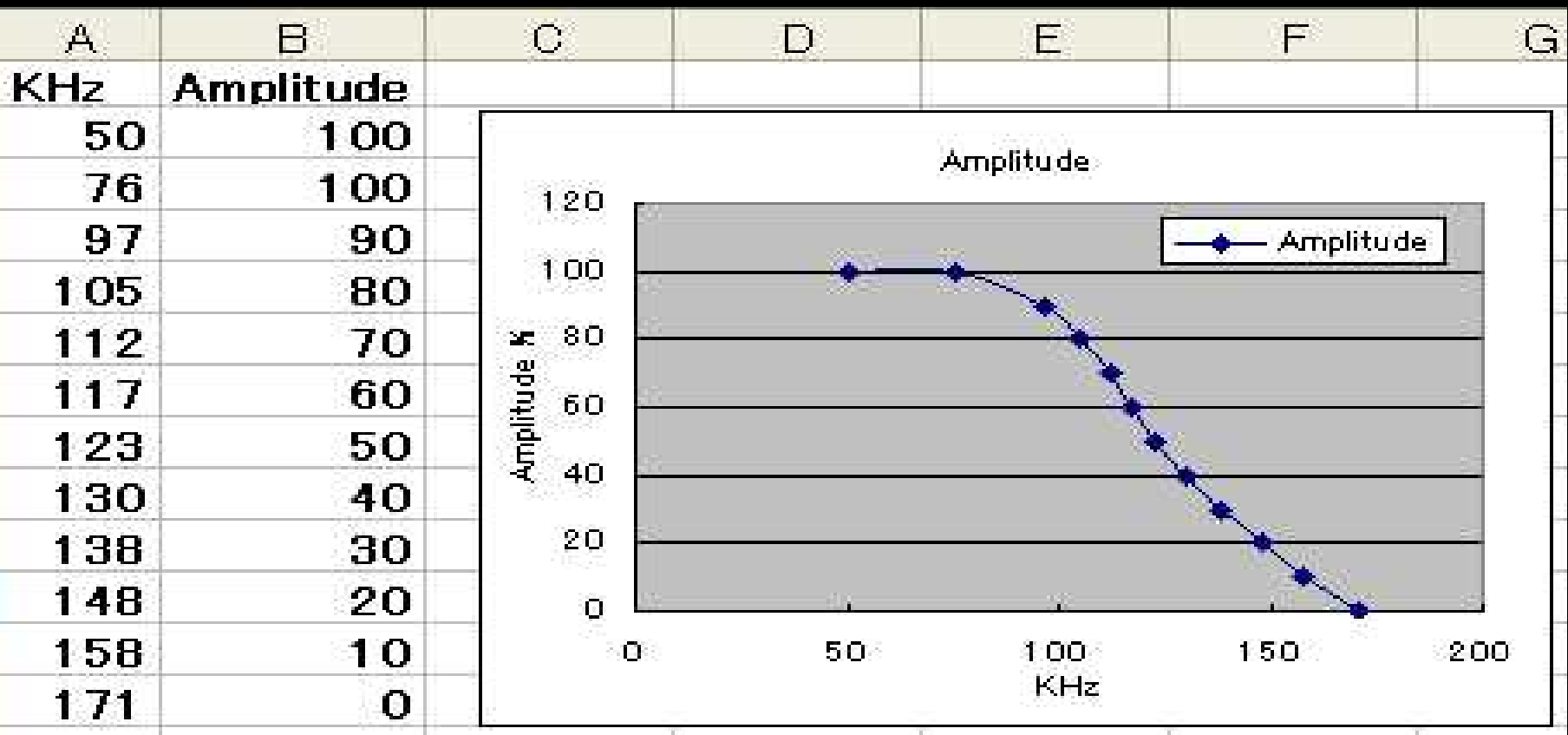


測定結果の例

振幅 (%)	周波数 (kHz)
100	76
90	97
80	105
70	112
60	117
50	123
40	130
30	138
20	148
10	158
0	171

この結果を Excel で表にして下さい。

(横軸にしたい値を A コラムに、縦軸にしたい値を B コラムに入れて
グラフウィザードを用いる。)



LR結合回路の抵抗電圧出力は、高周波を遮断することを確認し、
遮断周波数を求めて下さい。この例では、遮断周波数は 112 kHz。

LR結合回路の時定数 τ を求める。

$$\tau = L/R$$

例: $L = 1 \text{ mH}$ 、 $R = 1 \text{ k}\Omega$ $\tau = 0.000001 \text{ sec}$

高域遮断周波数 f を求める。

(電圧振幅を $1 / \sqrt{2} = 70.7\%$ にする周波数)

$$f = 1 / (2\pi\tau) = 159 \text{ kHz}$$

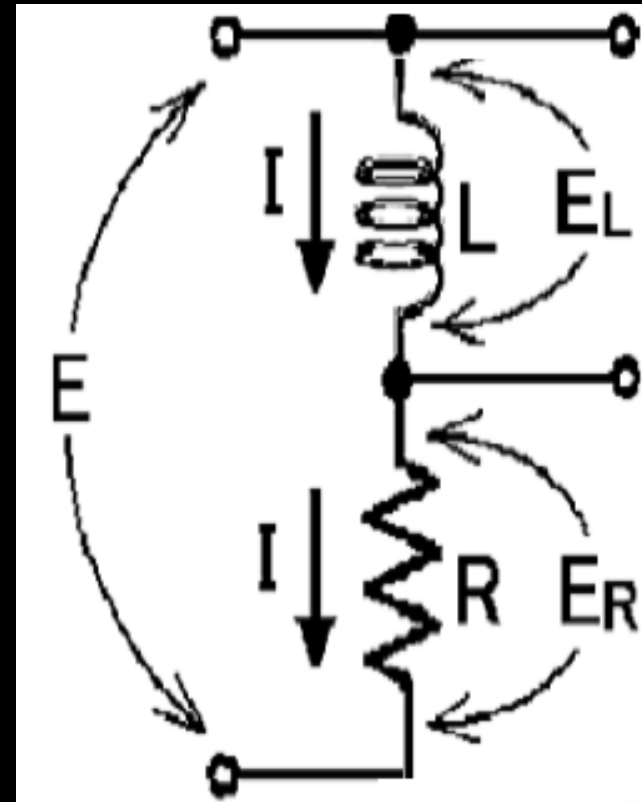
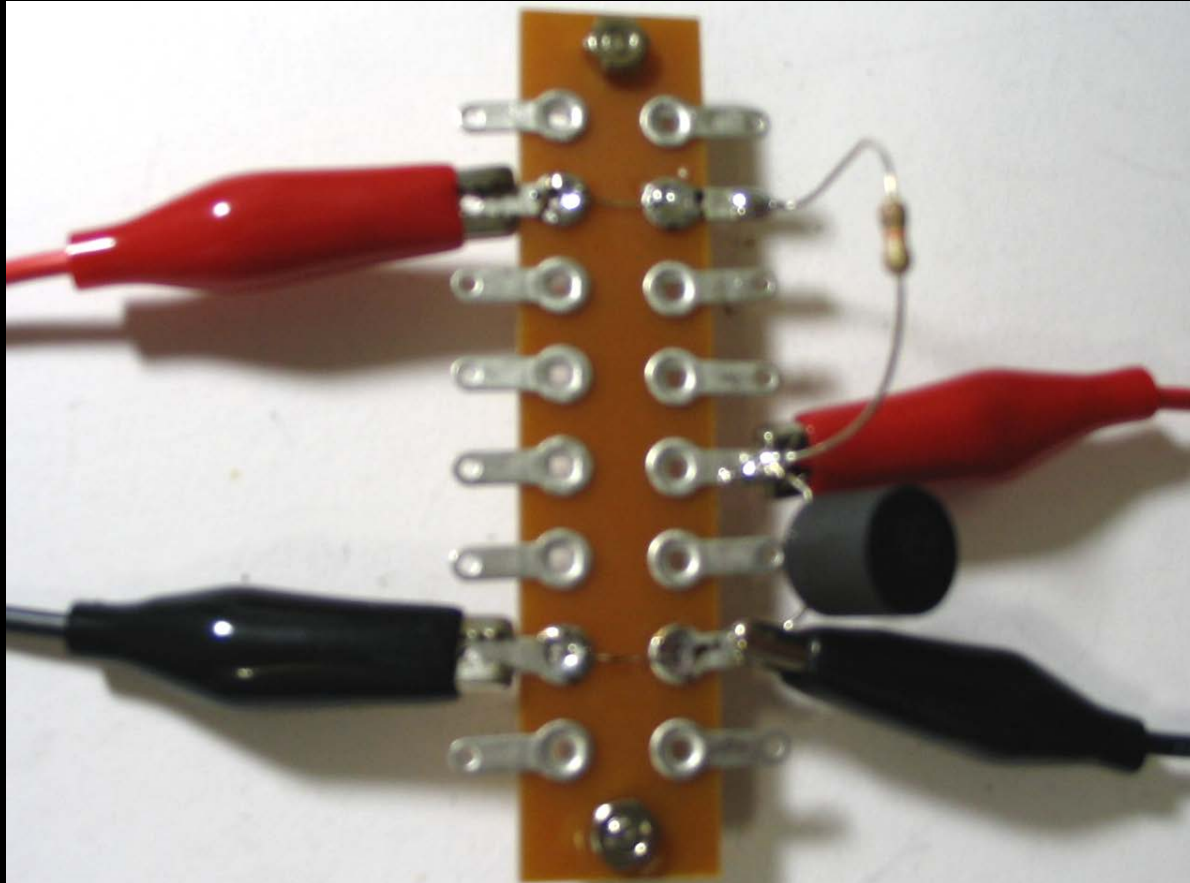
実験結果と、理論上の遮断周波数の誤差を計算して下さい。

誤差の要因は、インダクタンス値の誤差(10%)、抵抗値の誤差(5%)

および、測定ケーブルの静電容量(電氣的にコンデンサになっている)の影響が考えられる。

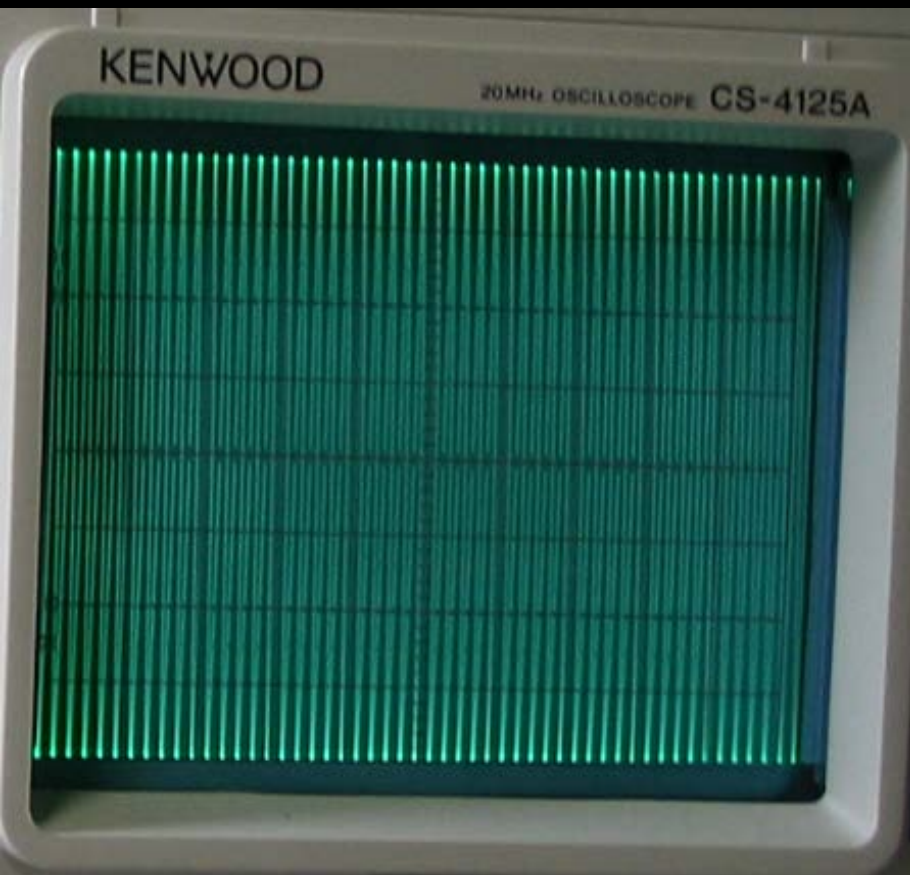
実験 2 LR結合回路の インダクタンス電圧

発振器の出力を、LR結合回路の両端につなぐ。
インダクタンス両端の電圧を、
オシロスコープの CH1 につなぐ。





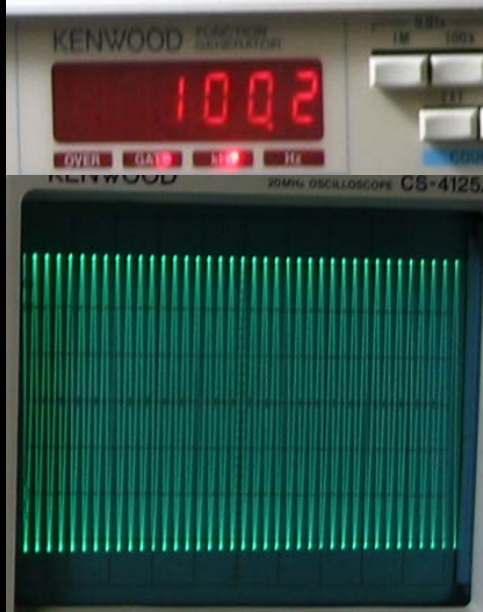
2000K Hz から次第に
周波数を下げて、
インダクタンス電圧が最大になる
周波数を探してください。



最大電圧を示す周波数で、
振幅が 4cm になるように調整。

振幅が数千KHz付近の高周波領域
では、周波数が高いほど振幅が
減少する。

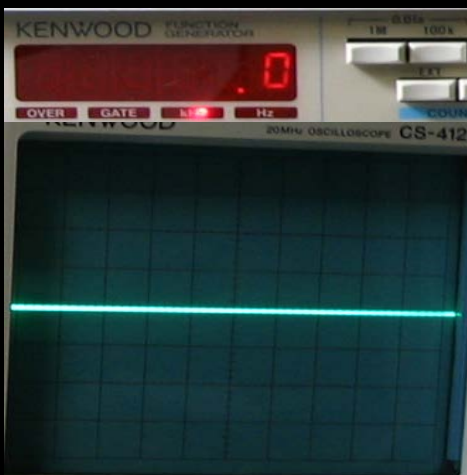
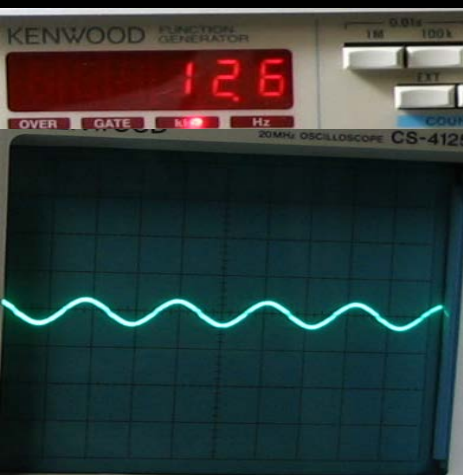
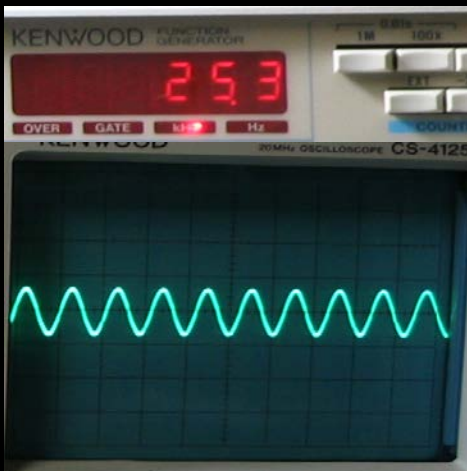
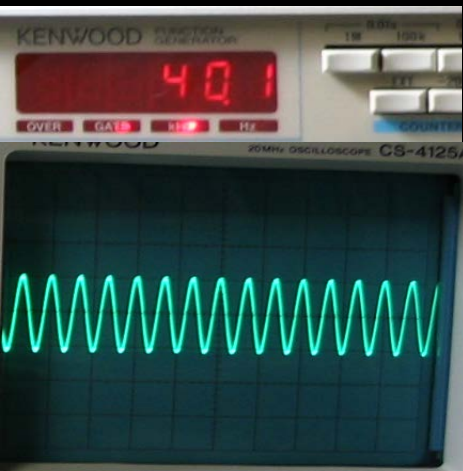
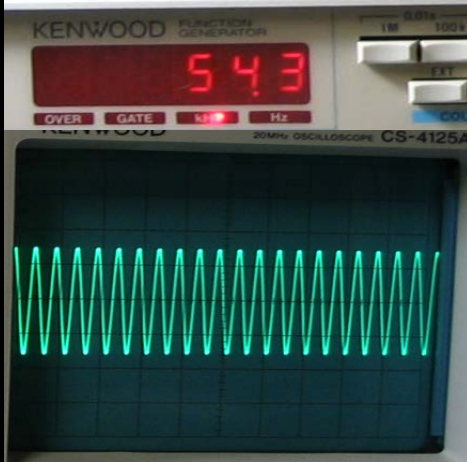
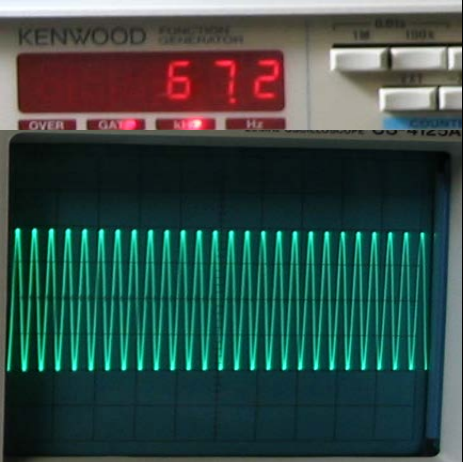
これは、ケーブルが静電容量を
持つため電氣的にコンデンサに
なってLCR共振回路になるため。



最大の振幅を示す周波数から
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%)、 0cm (0%)



を示す周波数を記録する。

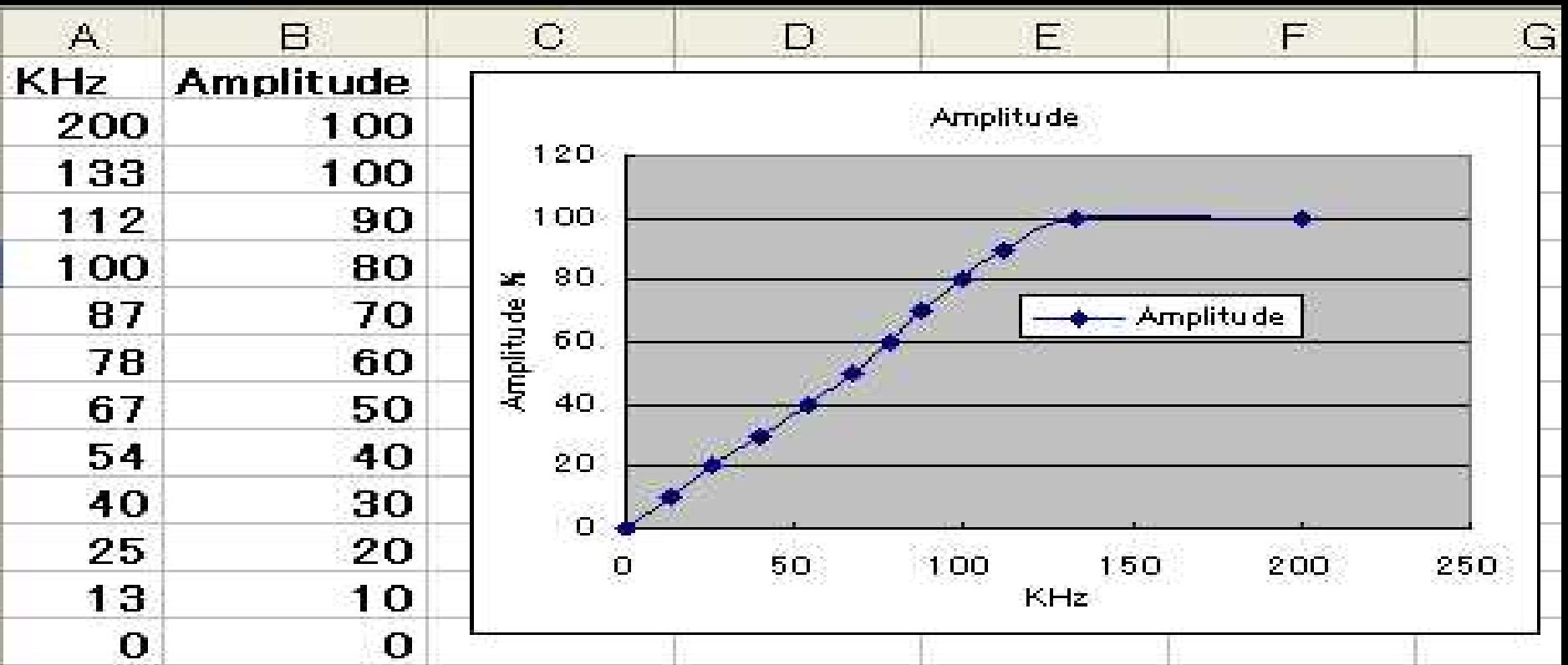


測定結果の例

振幅 (%)	周波数 (kHz)
100	133
90	112
80	100
70	87
60	78
50	67
40	54
30	40
20	25
10	13
0	0

この結果を Excel で表にして下さい。

(横軸にしたい値を A コラムに、縦軸にしたい値を B コラムに入れて
グラフウィザードを用いる。)



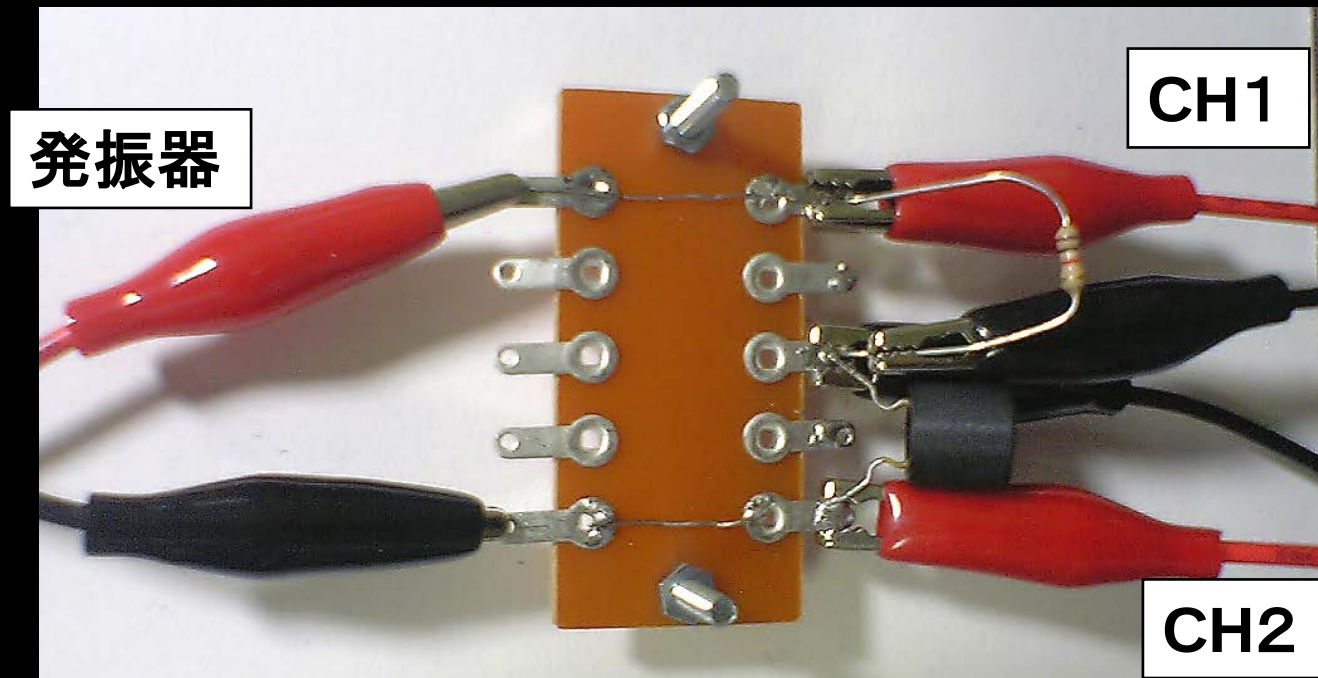
LR結合回路のインダクタンス電圧出力は、低周波を遮断することを確認し、
遮断周波数を求めて下さい。この例では、遮断周波数は 87 kHz。

実験 3 抵抗電圧とインダクタンス電圧の位相差

CR 結合回路の 両端に発振器の出力電圧をつなぎ、
オシロスコープの CH1 に 抵抗電圧をつなぎ、
CH2 に インダクタンス電圧をつなぐ。

CH1、CH2 のマイナス(黒)電極は、オシロスコープ内で
電氣的につながっているなので、同じ部位をつなぐ。

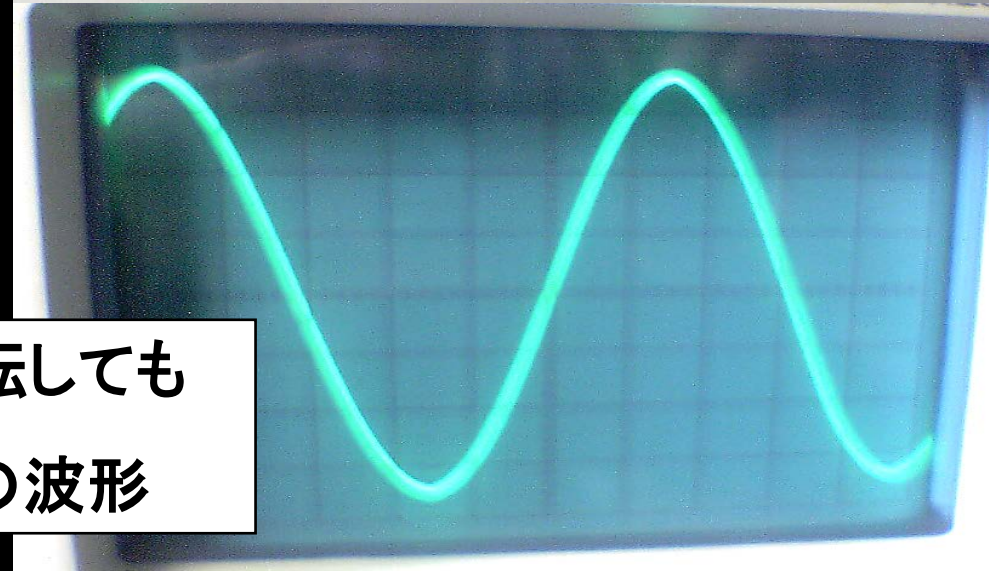
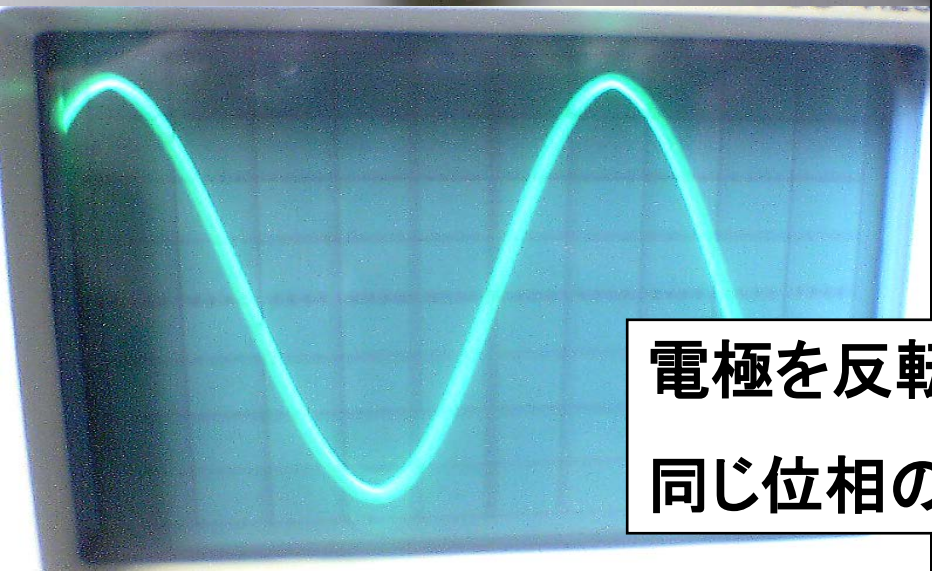
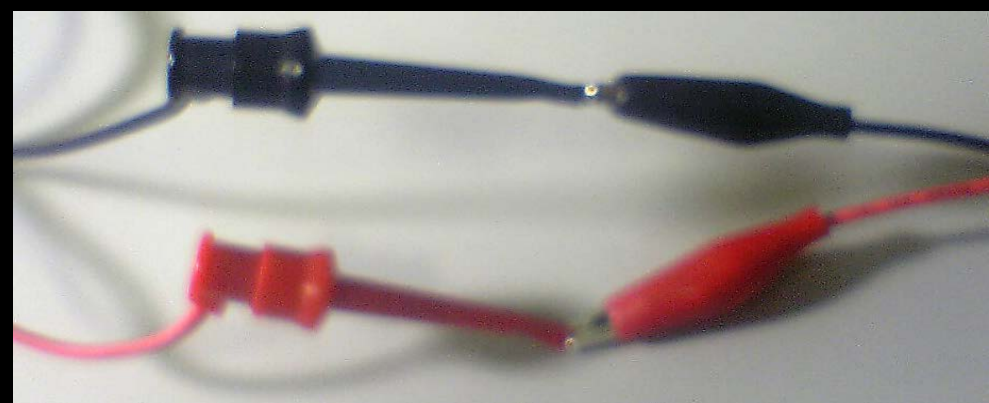
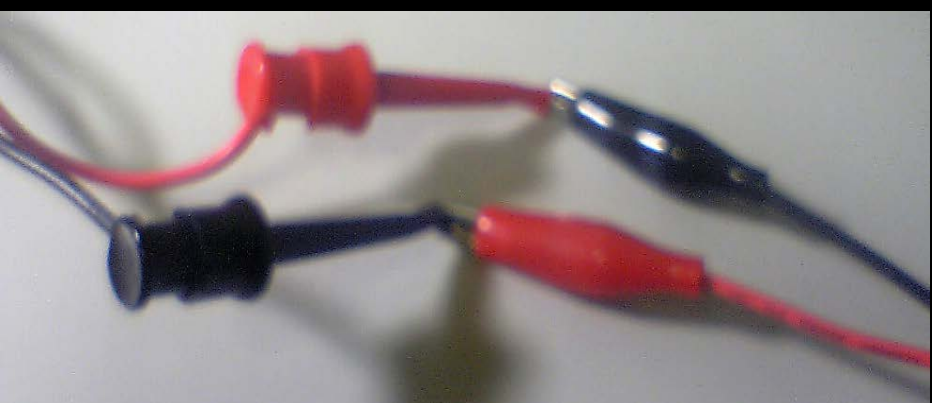
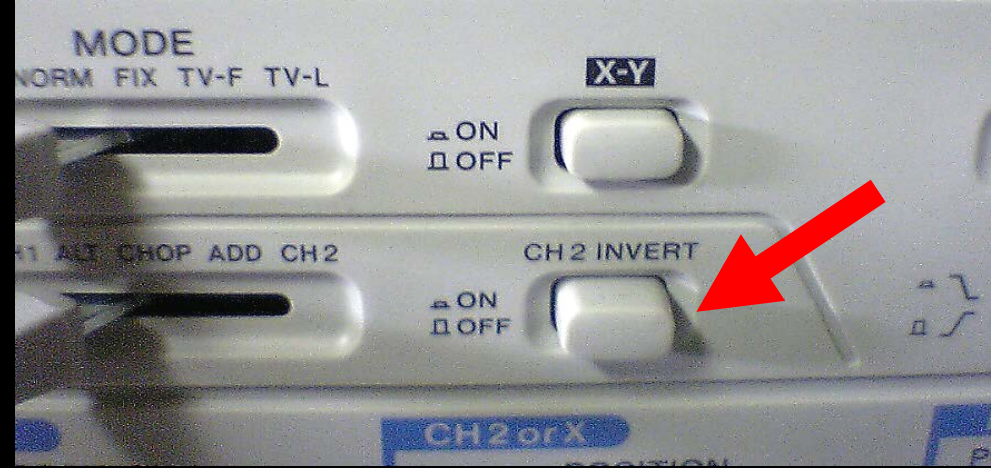
(黒電極は、抵抗とインダクタンスが結合している部位に。)



CH1 の 抵抗電圧の電極のプラスマイナスが、
CH2 のインダクタンス電圧の電極と 向きが逆転しているが、
オシロスコープの Sweep time は、UP-slope または
DOWN-slope トリガで検出しているので、
正弦波であれば、抵抗電圧信号波形が反転表示される
ことはない。

一応、そのような問題を解決するボタンがオシロスコープに
用意されているが（ CH2 INVERT ボタン； CH2信号の
プラスマイナスを反転させる）、
押しても CH2 信号は、見かけ上、反転しない。
（今回の実験では上下対称性の正弦波なので。）

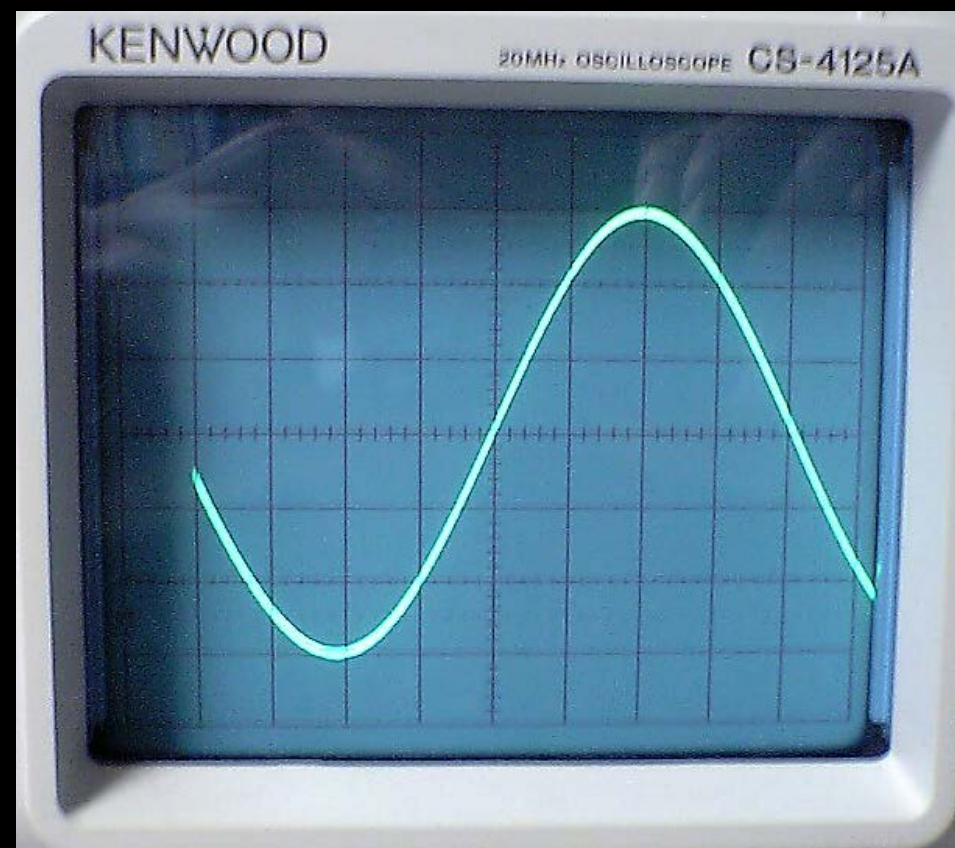
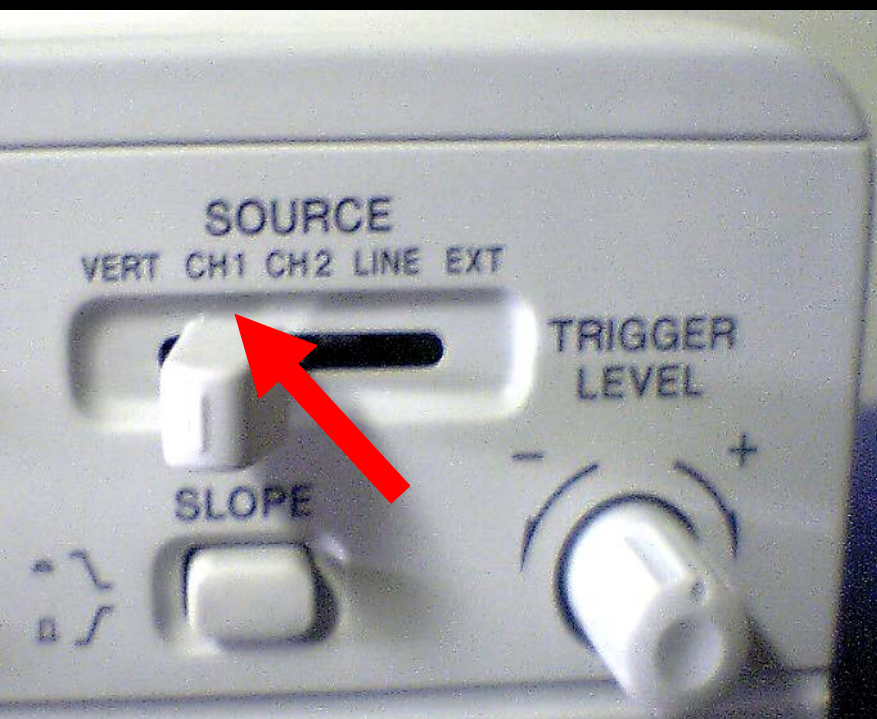
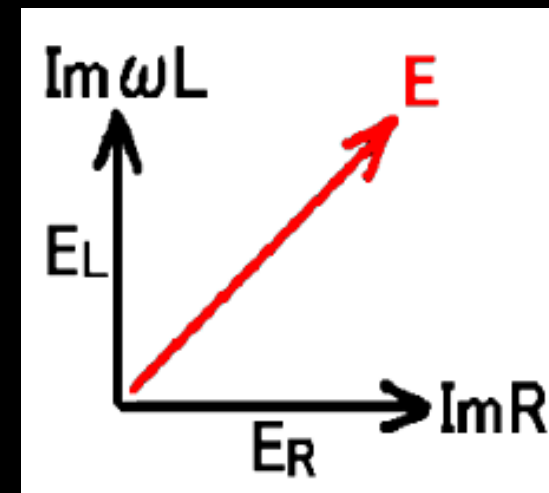
正弦波信号は
適切なトリガで、
電極を反転しても波形は
反転しない。



電極を反転しても
同じ位相の波形

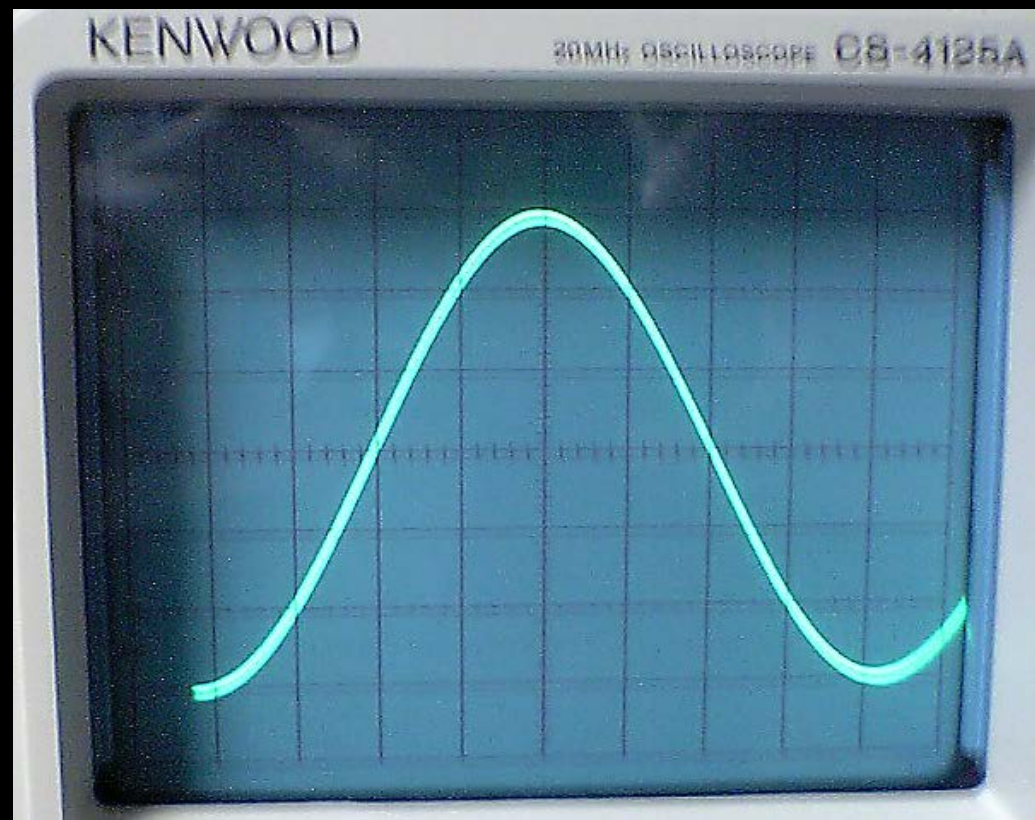
発振器の周波数を、遮断周波数に設定する。
(抵抗電圧とインダクタンス電圧が等しくなる
周波数)

SOURCEレバーを CH1 に設定して、CRT 上で
CH1 の信号を 振幅 3cm、波長 8cm の
正弦波 (sin 曲線) に調節する。

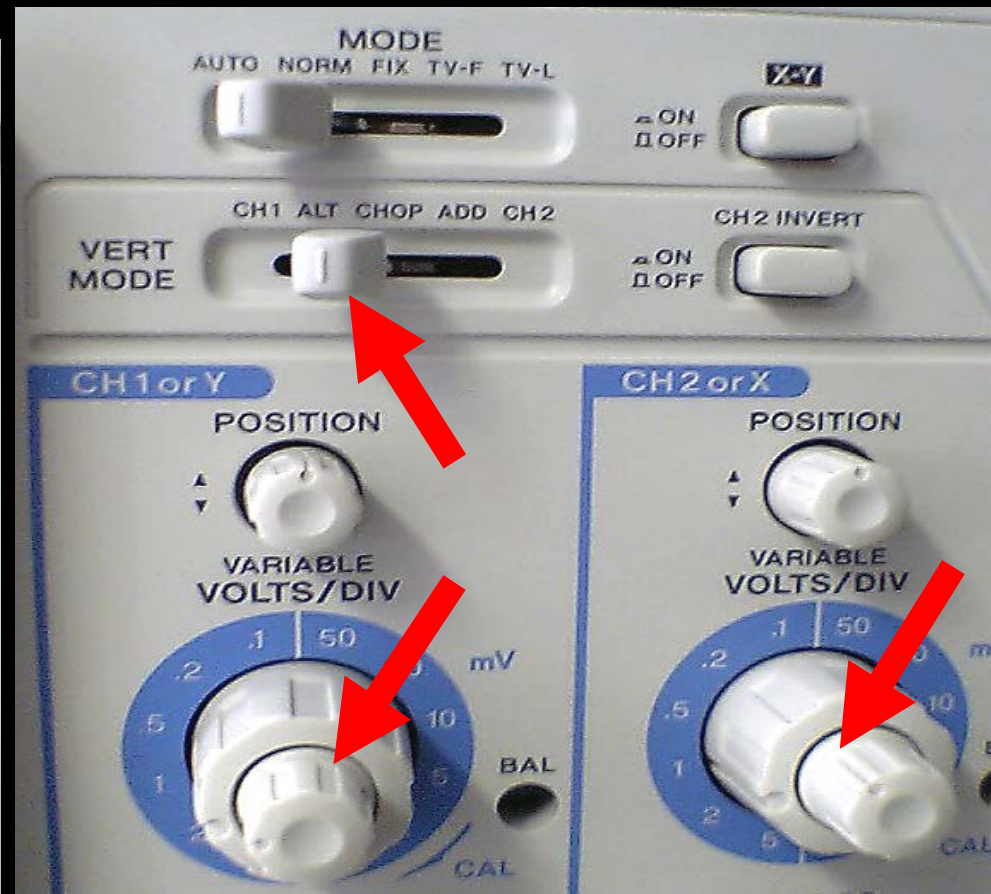
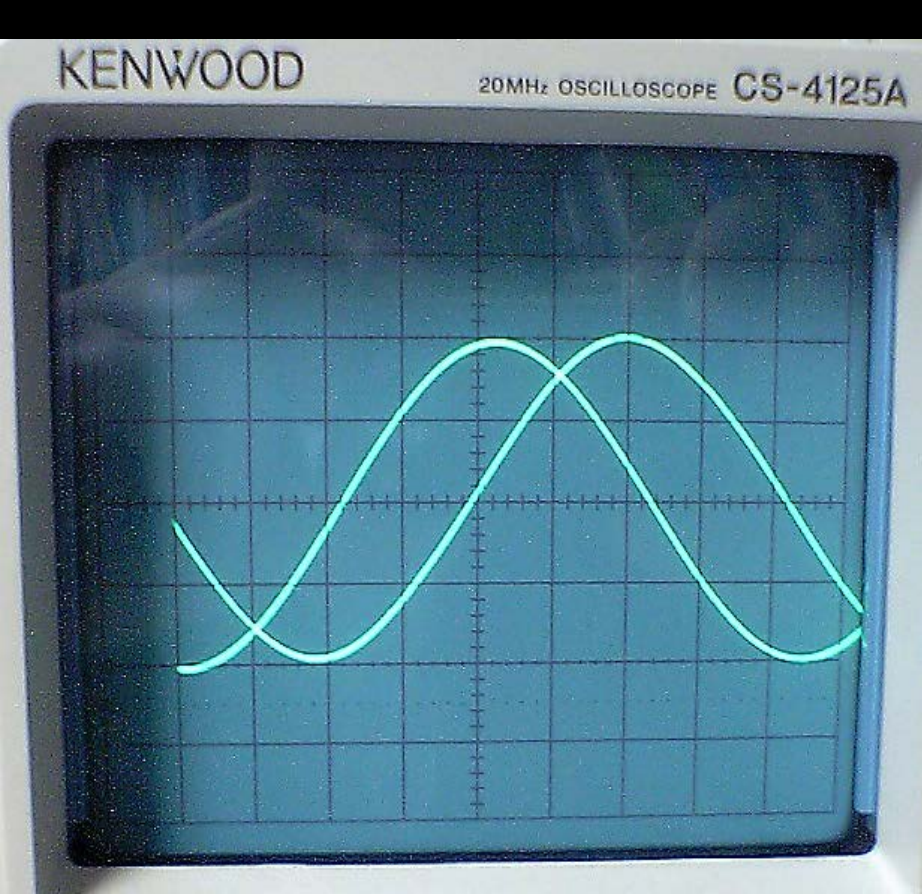


SOURCEレバーを CH2 にすると、CRT 上に CH2 の信号が表示される。振幅 3cm、波長 8cm の余弦波 (cos 曲線) が表示される。

インダクタンス(コイル)電圧は、抵抗電圧より、 90° 位相が進んでいる (1/4 波長 早い) ことが確認できる。

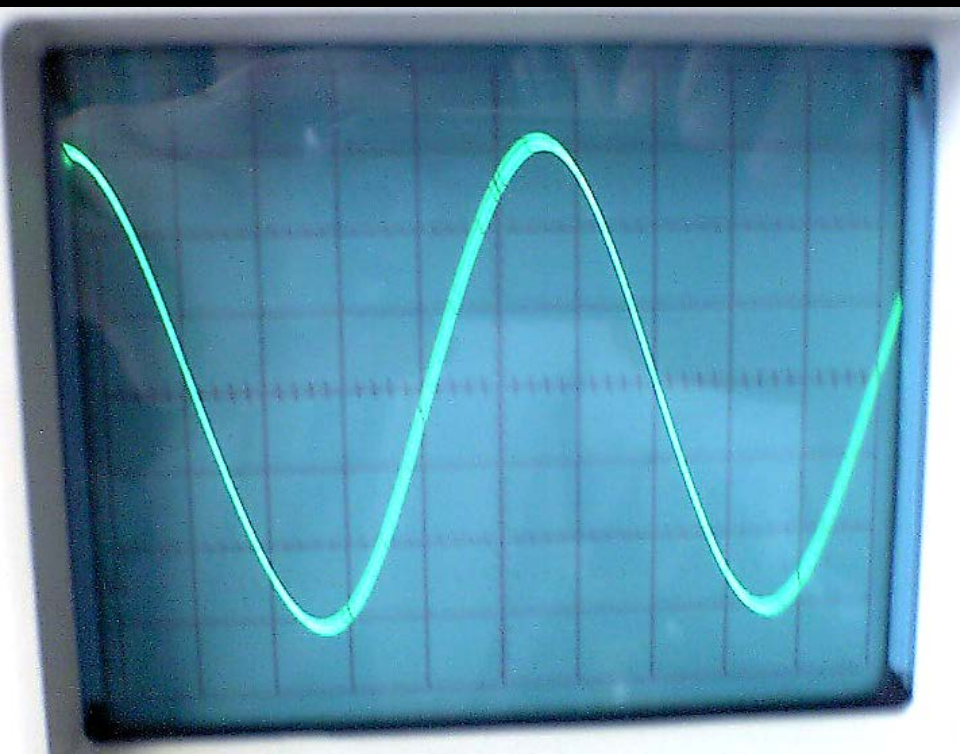


VERT MODE スイッチを、ALT または CHOP に切り替えると、CH1 (抵抗電圧) と CH2 (インダクタンス電圧) が、同時表示される。遮断周波数に設定した状態で、CH1 と CH2 の波形の振幅がともに 2cm になるように、CH1 と CH2 の振幅を調整してください。周波数を遮断周波数から少しずらすと振幅に差が生じることを確認して下さい。

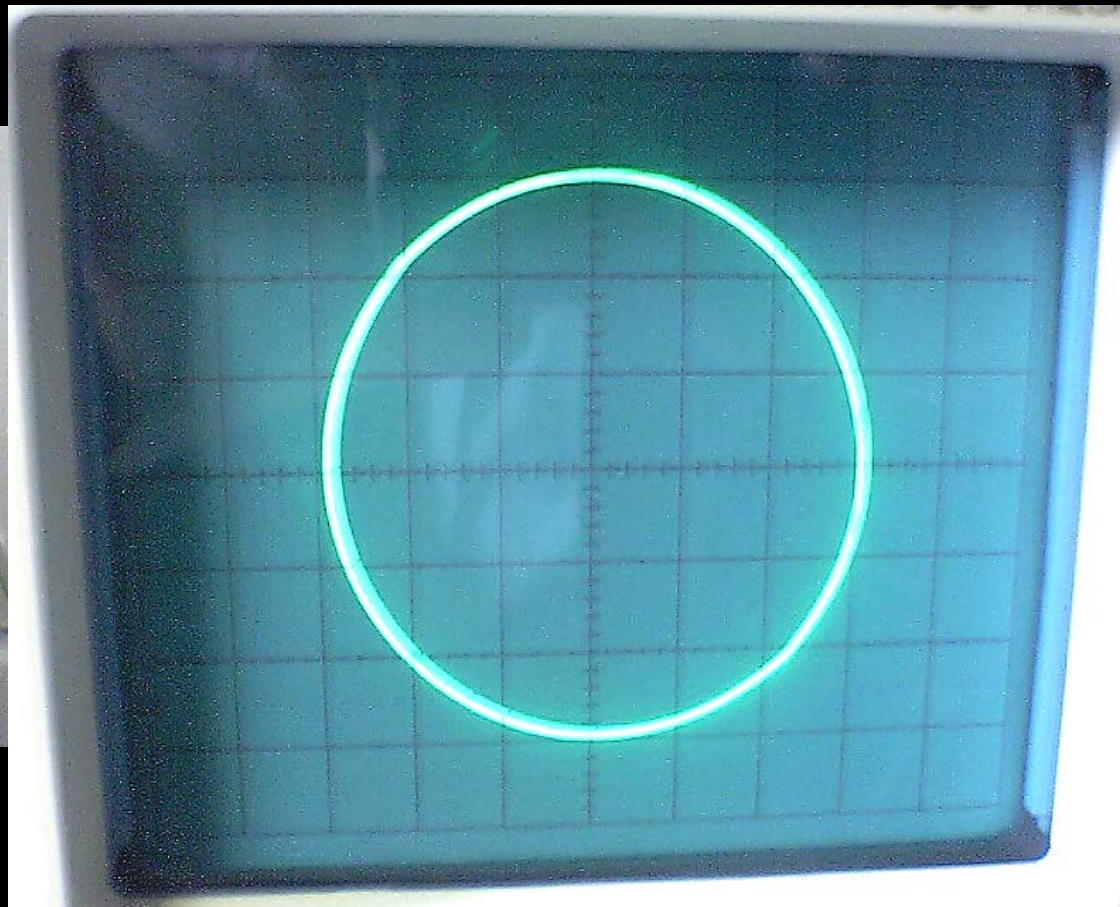
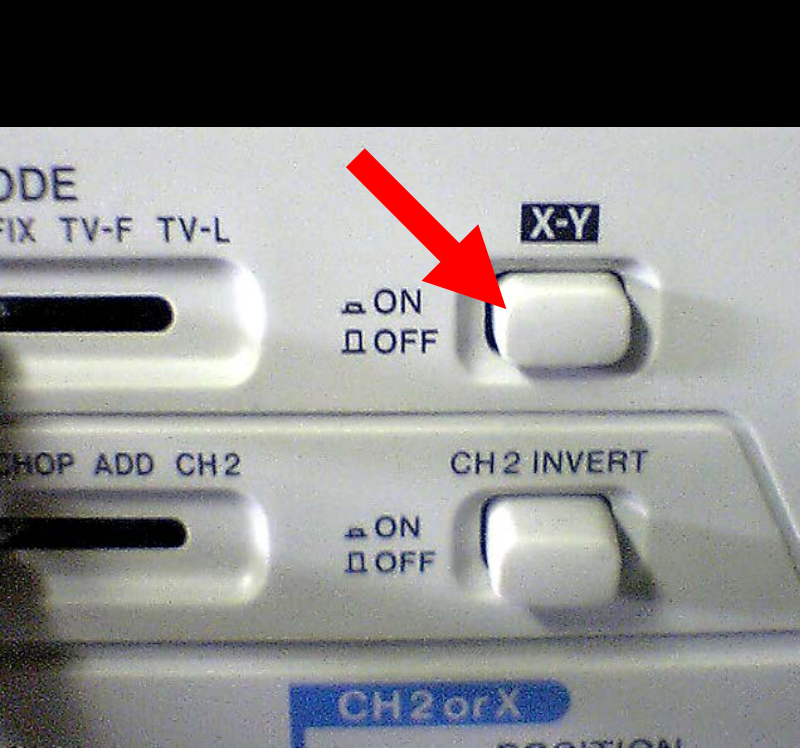


VERT MODE スイッチを、ADD に切り替えると、
CH1 (抵抗電圧) と CH2 (インダクタンス電圧) の和が、表示される。

遮断周波数に設定した状態で、振幅がともに 2cm の CH1 と CH2 の
和の信号の振幅が、4cm にならないことを確認して下さい。
理論上、2cm の $\sqrt{2}$ 倍になることを理解して下さい。



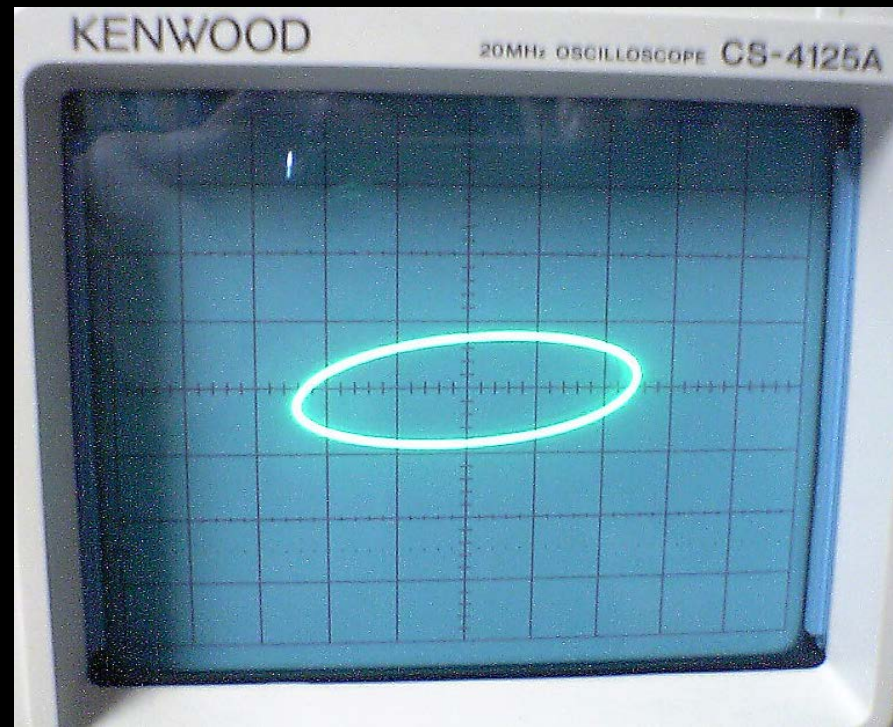
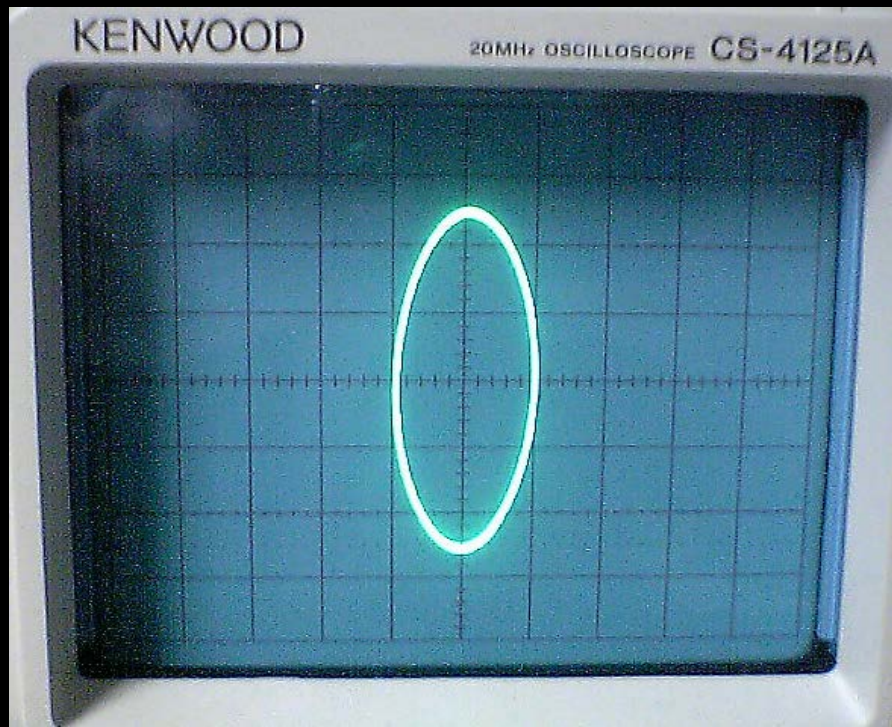
X-Y ボタンを押すと、縦軸に CH1（抵抗電圧）、
横軸に CH2（インダクタンス電圧）のリサージュ曲線が
出る。円が描画される。
（位置は、HORIZONTAL POSITION で調整して下さい。）



円が描画される理由（インダクタンス電圧が抵抗電圧より位相が 90° 進む理由）をレポートして下さい。

また、遮断周波数よりも周波数を高くすると、左右に長い楕円に変形し、低くすると上下に長い楕円に変形する。

この理由もレポートして下さい。



周波数を変化させると、抵抗電圧とインダクタンス電圧の比率が変化することを2波形同時表示で確認して下さい。

