

設計ガイドラインセミナー入門編

第1部 電気回路編

実験手引書

国立大学法人 電気通信大学

産学官連携センター ギガビット研究会

目次

A. 実験の準備	1
A.1 実験に使用する測定器	1
A.2 実験に使用する備品	1
1. 直流での電圧、電流と電界、磁界	3
問 1：直流回路の動作	3
2. 回路素子と電磁界	11
課題 1：キャパシタンスどうしの電界結合	11
3. 交流での電磁界と回路素子	11
任意波形は正弦波の集まり － FFT による矩形波パルスの周波数スペクトル表示 －	11
課題 2：抵抗回路の周波数特性	16
図 3.8：交流でのキャパシタの動作	20
図 3.11：隣接する導体(パッチ)間の電界結合	21
図 3.12：抵抗による放電と導体(パッチ)間に指を置いた場合	22
図 3.14：交流でのインダクタの動作	23
課題 3：インダクタどうしの磁界結合	24
図 3.17：インダクタの磁界結合 (結合するコイルが逆巻の場合、位相は反転する)	25
4. 交流での回路解析の手法	26
共振回路とは	26
(1) 直列共振	27
(2) 並列共振	30
5. 補遺	33
5.1 消費電力最大の法則の検証	33
5.2 無線電力伝送の模擬実験	35

注：テキストと同じ章立てとするため、「実験の準備」を A 章としました。

電気通信大学 ギガビット研究会
第 3 版 2017 年 10 月 5 日

設計ガイドラインセミナー入門編 第1部 電気回路編 実験手引書

A. 実験の準備

実験の準備段階として、使用する測定器と備品の概要について述べます。

A.1 実験に使用する測定器

(1) 波形発生器：(Keysight Technology 33500B) (詳細は別紙のマニュアルを参照して下さい)

- ・ 出力信号の最高周波数：30MHz
- ・ 電源をオンした後、[Channel]ボタンを押して、ソフトキーメニューの[Output]を[On]にします。
この初期操作はすべての実験で共通です。
- ・ 正弦波の周波数を掃引(スイープ：sweep)させて、振幅周波数特性の概要を測定することができます。(別紙マニュアルの P12 を参照してください)

【注意 1】 出力電圧は、 50Ω 負荷の時の負荷電圧で表現されています。電源の内部抵抗は 50Ω ですので 無負荷時の出力電圧はパネルに表示されている電圧の 2 倍であることに注意してください。

(2) オシロスコープ：(Keysight Technology DSO-X 2024A) (別紙のマニュアルを参照して下さい)

測定データを USB メモリーに保存する方法は別紙マニュアルの p.23 を参照してください。

【注意 2】 プローブのカラーチップの色とグラフの色は次のように各チャンネル(Ch)に対応しています。

Ch1(黄色)、Ch2(緑色)、Ch3(青色)、Ch4(赤色)

演算結果(Math)のグラフは(薄紫色)で表示されます。演算結果はチャンネル間でデータを四則演算した結果を表示するものです。(演算機能について別紙マニュアルの p14 を参照して下さい)
オシロスコープのディスプレイや印刷用プリンタの発色特性により、カラーチップの色とは異なります(特に黄色はオレンジに近い発色になっています)がご了承ください。

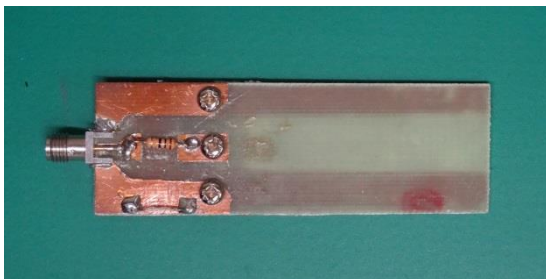
【注意 3】 [Run/Stop]ボタンの下にある[Default Setup]ボタンを押すと初期(工場出荷)状態に戻ります。
オシロスコープが不安定になった場合や、所期の動作をしなくなった場合には初期(工場出荷)状態に戻してみてください。

A.2 実験に使用する備品

(1) 実験器材(治具・ケーブル等)：

各設問や課題で共通に使用する実験器材は以下の通りです。

・ 信号供給用治具



信号供給用治具には電流測定等のため、あらかじめ約 10Ω の抵抗が信号入力端に直列に接続されています。

信号供給用治具

- ・信号供給用同軸ケーブル (黒 BNC-SMA) 1 本 (波形発生器に装着)
- ・外部トリガ供給用同軸ケーブル (黒 BNC-BNC) 1 本 (波形発生器とオシロスコープを接続)

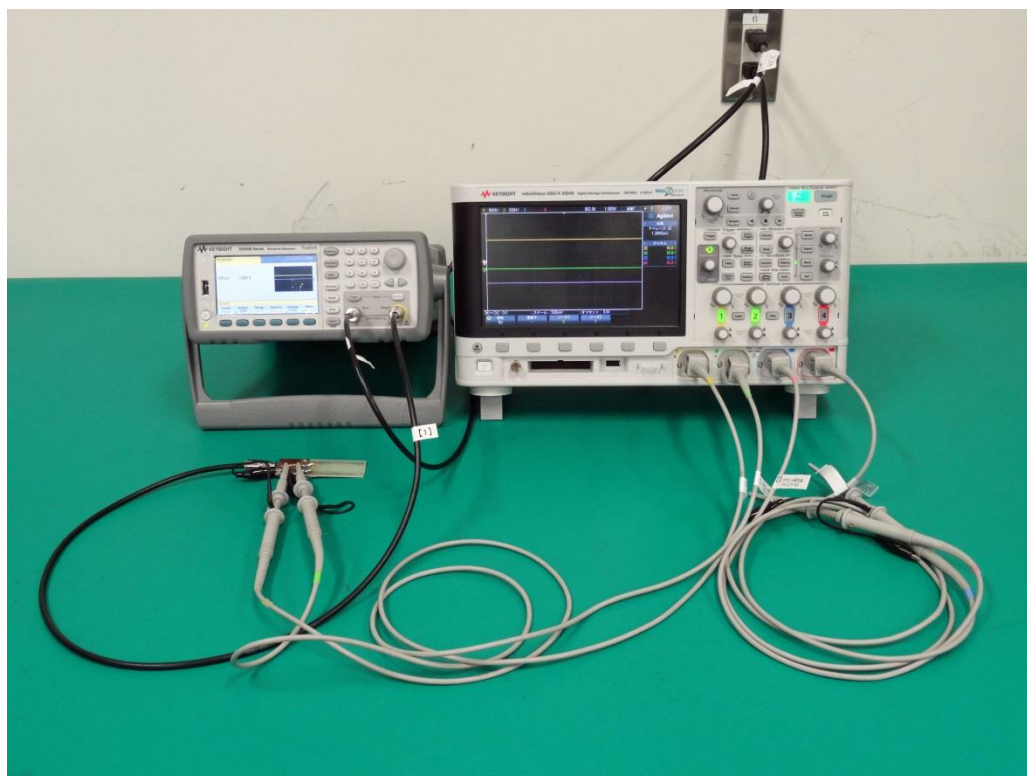
・実験の基本構成

実験用器材の説明の途中ですが、ここで実験の基本構成について述べておきます。下図(写真)を参照してください。本実験は、信号供給用同軸ケーブルの BNC コネクタを波形発生器の出力(Output)に接続し、SMA コネクタを信号供給用治具の入力に接続して行います。

後述する実験試料は、信号供給用治具の SMA コネクタに直列接続されている電流測定用の抵抗(10Ω)と GND(グラウンド)の間に挿入し、ドライバを用いてビス止めします。

外部トリガ供給用同軸ケーブルを用いて、波形発生器の Output の横にある Sync とオシロスコープの裏面右上にある EXT TRIGGER IN を接続します。

実験試料の入出力波形は、オシロスコープのプロープを観測点に接続して測定します。



実験の基本構成

信号供給用治具の実装状態は間 1-(1)の場合と同様

(2) 実験試料(抵抗、キャパシタ、インダクタ等)：

各設問や課題で使用する実験試料については設問や課題ごとに示します。回路素子(R, L, C)の値としては、Agilent 社製の Handheld LCR Meter U1732C を用いて 1kHz で測定した値を示してあります。本実験手引書で示した値と若干異なることもあると思いますがご了承ください。なお、共振回路における L の値については共振のところで「参考」として考察します。

(3) ドライバ



伝送線路や回路部品を治具にビス止めするために使用します。

(4) アルミ板



アルミ板は安定したグラウンド状態が必要な時に用います。課題 2 の実験ではグラウンド状態を安定させるため、およびプローブのグラウンドをとるために使用します。

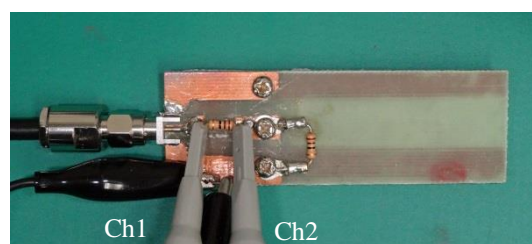
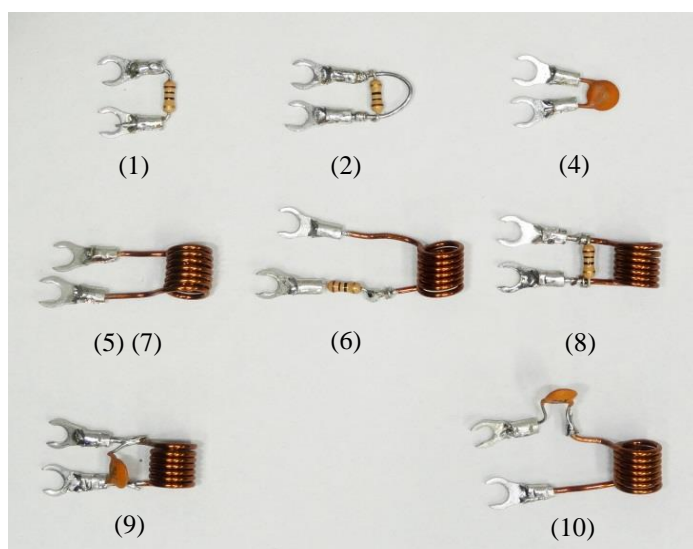
1. 直流での電圧、電流と電界、磁界

問 1：直流回路の動作

- 本実験では、直流電圧源に接続された定常状態における回路の動作を確認します。(1)電圧と電流の関係、(2)短絡回路と開放回路の意味、(3)電流が流れないということをどのように理解するか、(4)インダクタやキャパシタの動作をどのように理解するかが問題となります。

・実験試料

「信号供給用治具」に下記の部品を接続して実験します。ただし、問 1-(5)と(7)で同一インダクタ(L)を使用します。



問 1-(1)の実装例

(1) R	(2) R と導線の並列	(6) R と L の直列
(4) C	(8) R と L の並列	(9) C と L の並列
(5)と(7) L	(10) L と C の直列	

問 1 の試料

問 1 は DC(直流)に関する設問です。波形発生器から直流電圧を発生させて、オシロスコープで各部の電圧波形(電圧レベル)を観測します。

・波形発生器の設定

[Channel]ボタンを押して、ソフトキーメニューの[Output]を[On]にします。(すべての実験で共通)

[Waveforms]ボタンを押して表示されるソフトキーのWaveformメニューにある[More 1 or 2]を押して[DC]を選びます。ディスプレイに[Offset]と表示されるので、テンキーで1.5Vに設定します。

・オシロスコープの設定

Ch1 と Ch2 の垂直コントロール部のチャンネル表示ボタンを押して、チャンネルメニューのソフトキーで[DC 結合]を選択します。

垂直スケールノブを調整して 500mV/に設定します。注：問 1-(2)以降は状況に応じて適宜設定します。

水平スケールは(直流なので任意に選んで問題はありますが、ここでは)1.000ms/に設定します。

・演算機能を用いた電流値の測定

使用するオシロスコープ用のプローブは電圧測定用であり、電流プローブは用意されていません。

従って、電流 i を測定する位置に抵抗 R を挿入し、抵抗 R の両端の電圧 v_1 と v_2 の差 $v_1 - v_2$ を求めた後、 $(v_1 - v_2)/R = i$ の関係を用いて電流 i を求めます。

オシロスコープのフロントパネル右側の追加キー群の中の[Math]演算キーを押すとチャンネル間の演算結果が薄紫色で表示されます。(別紙マニュアルの p14 を参照) 薄紫色で表示された値は電圧値ですから電流値は抵抗値 R で除算したものであることに注意してください。電流の位相のみを問題にする場合には換算する必要はありません。

・周期信号波形のノイズ低減

信号波形のノイズが気になる場合(特に差分信号を表示する場合にはオシロスコープの同相信号除去機能に限界があるため、ノイズが目立ちます)、周期信号であればアベレージング(平均化处理)によって、表示する信号のノイズを低減することができます。

操作パネルの[Waveform]キーの中から[Acquire]キーを選ぶと、ディスプレイの下部に収集メニュー「収集モード」と「# 平均」が表示されます。

「収集モード」ソフトキーで「アベレージング」を選ぶと繰り返し波形の平均が演算されます。次に「# 平均」ソフトキーを押し、入力ノブを回して平均演算の回数を選びます。ここでは、32 に設定しました。

・カーソルについて

オシロスコープ上でデータを正確に読み取るためにカーソルが用いられます。

カーソルは、選択した波形ソース上のX 軸値とY 軸値を示す、水平マーカと垂直マーカです。

カーソルを使って、オシロスコープ信号に対する電圧や時間などを測定できます。

カーソル情報(カーソルに対応した測定値)は右側の情報領域に表示されます。

カーソルの位置は表示されている領域に制限されません。カーソルを設定した後、波形のパンやズームを実行したためにカーソルが画面の外に出ても、カーソルの値は不変です。元の位置に戻ると、カーソルは同じ位置に存在します。

ここでは、DC電圧値を測定するためのYカーソルの使い方についてのみ述べます。

Y カーソルは、垂直方向に移動する横の破線で、(ここでは)電圧値(ボルト)の測定に使用します。

Y1 カーソルは横の短い破線、Y2 カーソルは横の長い破線です。

Y カーソルは、垂直方向に移動し、通常は波形のグラウンド・ポイント(ここでは0ボルト)を基準とした値を示します。

DC測定で読み取り精度を上げるために垂直分解能を上げた場合、波形を画面表示するためにはオフセットを大きくとる必要がありますが、カーソルを用いることによって分解能が低い状態での読み取り誤差に比べてより正確な値を示すことになります。

測定手順

1. 信号をオシロスコープに接続し、安定した表示を得ます。

2. [Cursors] カーソル・キー(操作パネルのMeasure コントロールにある)を押します。

表示画面の右側の情報領域にカーソル・ボックスが表示され、カーソルがオンであることを示します(カーソルをオフにするには、[Cursors] カーソル・キーをもう一度押します)。

3. カーソル・メニューで、モードを押し、必要なモード(ここでは「手動」)を選択します。

4. ソースを押し、カーソル値の入力ソース(ここでは測定する信号のチャンネル番号)を選択します。

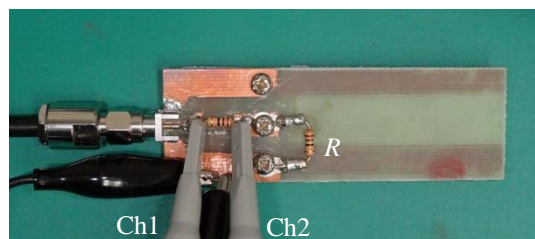
5. 調整するカーソルを選択します。

カーソル・ノブを押してから、カーソル・ノブを回します。選択を確定するには、カーソル・ノブをもう一度押すか、ポップアップ・メニューが消えるまで約5 秒待ちます。

または、カーソル・ソフトキーを押し、入力ノブを回します。

6. 選択したカーソルを調整するには、カーソル・ノブを回します。

問 1-(1)



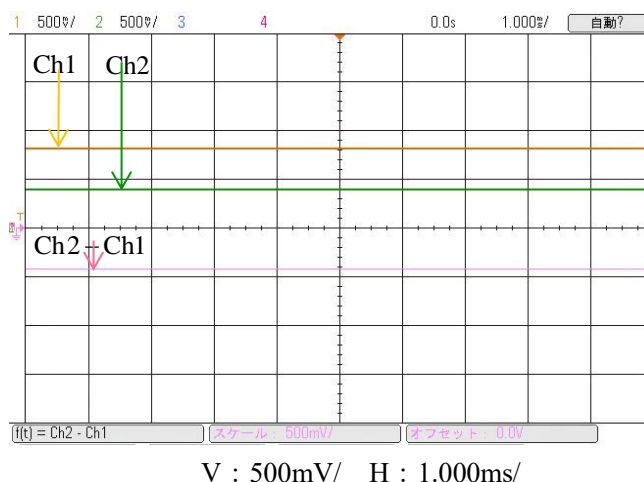
測定回路 ($R \cong 10\Omega$)

測定結果

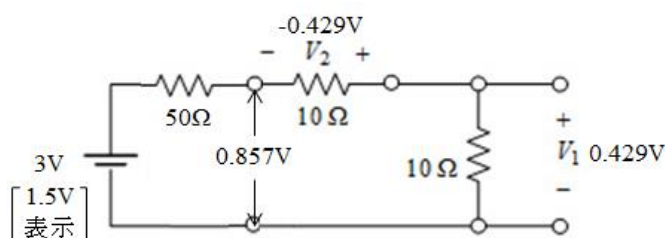
$$\text{Ch1} = V_2 + V_1 = 0.855\text{V}$$

$$\text{Ch2} = V_1 = 0.42\text{V}$$

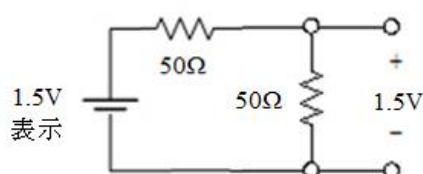
$$\text{Ch2} - \text{Ch1} = V_2 = -0.435\text{V}$$



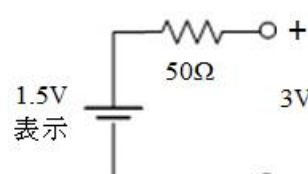
問 1-(1)の回路には、下図のように内部抵抗 50Ω の信号源から 3V が供給されています。



この場合、信号発生器の表示は 1.5V となっています。【注意 1】で述べたように、この波形発生器では 50Ω で終端した場合の出力端子間の電圧が出力電圧として表示されます。



(a) 50Ω 終端



(b) 出力端開放

上図(a)のように 50Ω で終端した場合には信号発生器の表示通りの値が終端抵抗の両端に表れますが、同図(b)のように終端を開放した場合、終端の電圧は 3V になります。このような場合、通常、「信号源は内部抵抗 50Ω 、出力電圧 3V である」と表現しますが、この波形発生器では 50Ω で終端した場合の出力端子間の電圧を表示しますので注意が必要です。

上記実験例における測定結果のグラフで Ch1(黄色)は 3V の電圧を $(10+10)/(50+10+10)$ に分圧した 0.857V になるはずですが、また、Ch2(緑色)は、その値をさらに $1/2$ に分圧した 0.429V になるはずですが。

しかし、先に述べたカーソルを用いる方法で電圧値を読み取ると Ch1(黄色)は 0.855V 、Ch2(緑色)は 0.42V になっています。この理由は、公称 10Ω の抵抗値が正確に 10Ω でないための誤差が生じているからです。

各実験グループで用いる部品にはバラツキがありますので、必ずしも実験手引書と全く同じ結果にはならないことをご了解ください。

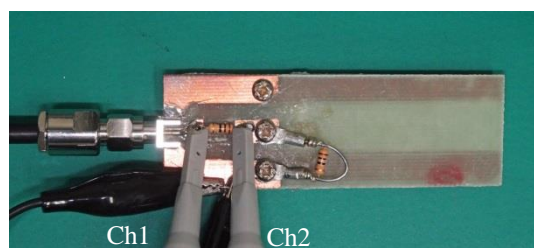
演算結果のグラフ(薄紫色)は Ch2 から Ch1 を減算したものです。グラフの左下にある $f(t) = \text{Ch2} - \text{Ch1}$ の表示がそれを示しています。テキスト問 1 の図(1)の V_2 には(−) と(+)の記号が付いています。これは、マルチメータのプラス側とマイナス側を接続する部分に(+)と(−)の記号を付けてあるのですが、このオシロスコープはプローブのマイナス側を常に GND(グラウンド)に接続しておく必要があります。したがって、Ch1 と Ch2 のプローブを上記の写真のように接続した場合、Ch2 (+側)から Ch1 (−側)を減算してやればテキスト問 1 の図(1)の V_2 の値が求まることになります。つまり、 V_2 の値は $\text{Ch2} - \text{Ch1} = 0.42\text{V} - 0.855\text{V} = -0.435\text{V}$ になります。

注： オシロスコープの測定電圧には数 mV のオフセットがあることに注意してください

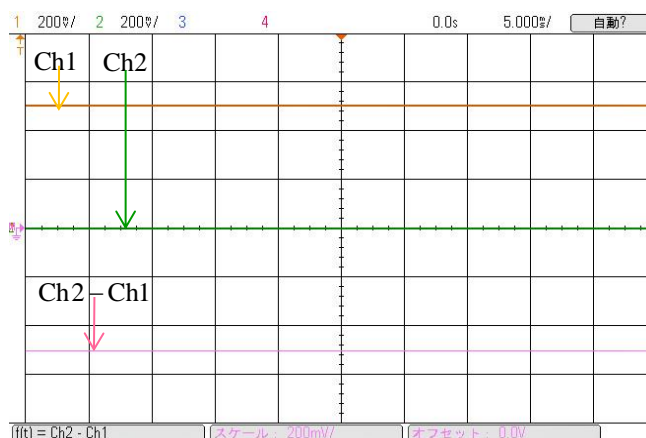
注： 演算波形を表示する方法については、オシロスコープのマニュアルの p.14 「演算波形を表示するには」を参照してください。

問 1-(2)から(10)までの実験における測定器の操作法や考え方は問 1-(1)の場合とほぼ同様ですので、測定回路の写真と測定結果のグラフのみ示します。実験で確認してください。

問 1-(2)

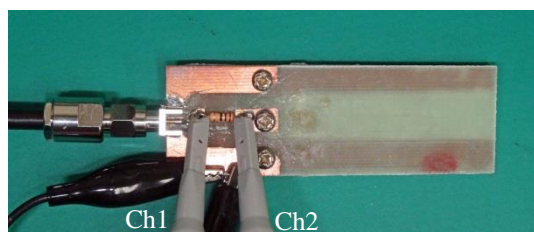


出力端短絡なので $\text{Ch2} = V_3 = 0\text{V}$
 (ただし、Ch2 には約 $4\text{mV} = -0.004\text{V}$ の
 オフセットがあります)
 $\text{Ch1} = V_4 + V_3 = 0.496\text{V} \cong (10/60) \times 3 = 500\text{mV}$
 $\text{Ch2} - \text{Ch1} = V_4 = -500\text{mV}$

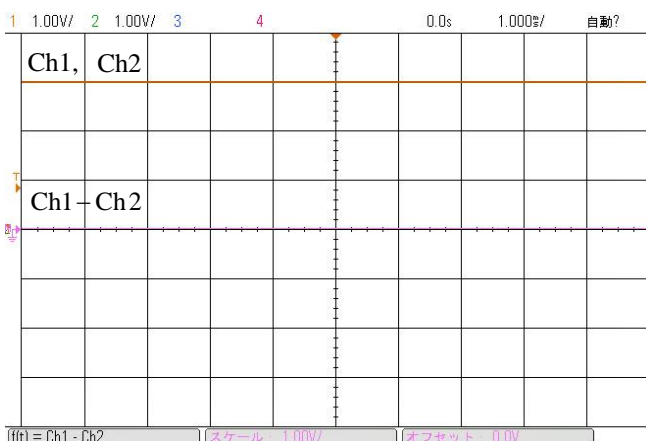


V : 200mV/ H : 1.000ms/

問 1-(3)

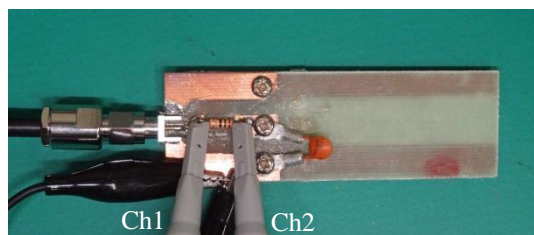


出力端解放なので
 $\text{Ch1} = 3\text{V}$ 、 $\text{Ch2} = V_5 = 3\text{V}$
 $\text{Ch1} - \text{Ch2} = V_6 = 0\text{V}$



右図で Ch1 と Ch2 は重なっており、Ch2(緑色)は見えていません。

問 1-(4)



$$C \cong 84\text{pF}$$

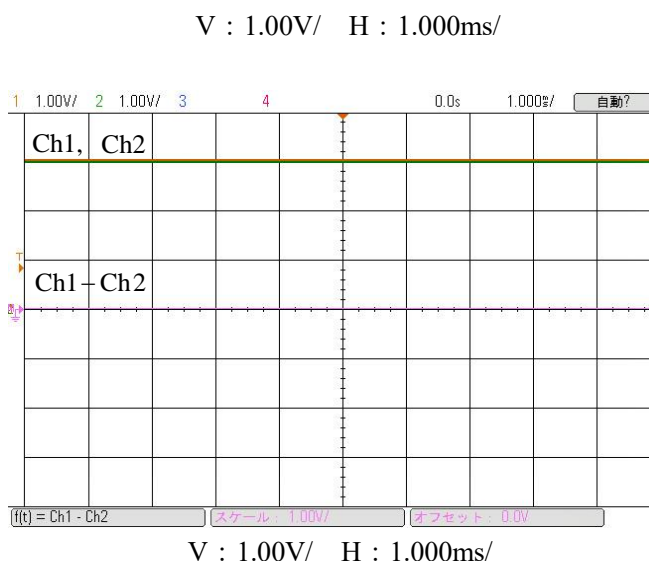
直流(DC)電荷で充電された定常状態のキャパシタに電流は流れず、開放と等価です。

従って

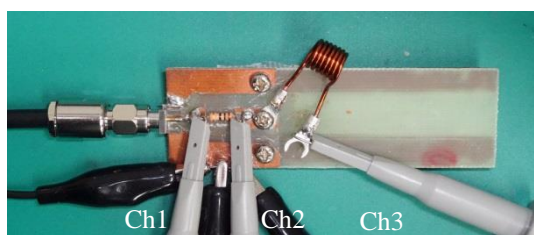
$$\text{Ch1} = V_8 + V_7 = 3\text{V}, \text{Ch2} = V_7 = 3\text{V}$$

$$\text{Ch1} - \text{Ch2} = V_8 = 0\text{V}$$

右図で Ch1 と Ch2 は重なっています。



問 1-(5)

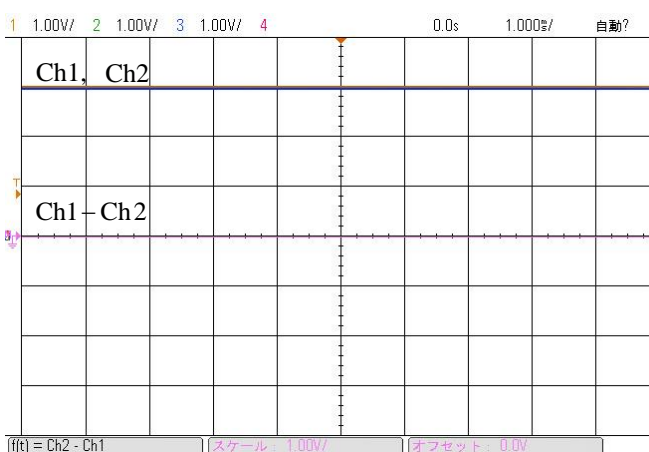


$$L \cong 0.44\mu\text{H}$$

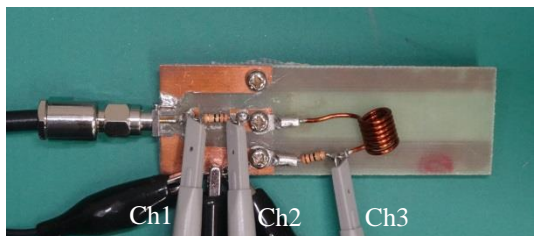
出力端子開放なので

$$\text{Ch1} = \text{Ch2}(V_9) = \text{Ch3}(V_9') = 3\text{V}$$

Ch1、Ch2、Ch3 のいずれも電源電圧の 3V が表示されています。従って、



問 1-(6)



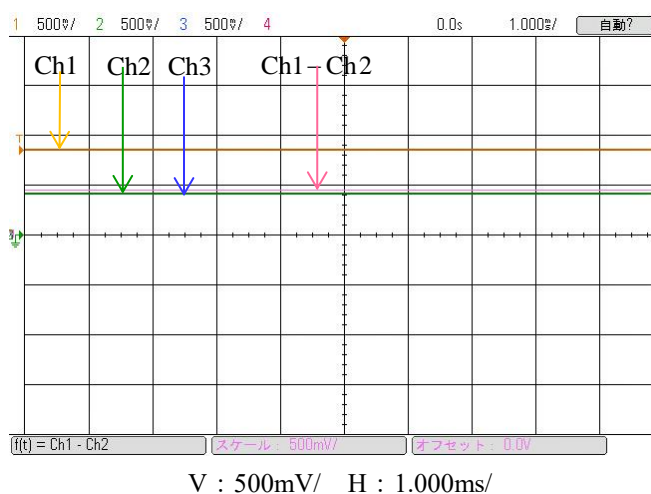
$$L \cong 0.48\mu\text{H} \quad R \cong 10\Omega$$

直流(DC)なので L の両端の電圧 V_{13} は 0V

従って Ch2 と Ch3 の電圧は等しい。

$$\text{Ch1} = V_{14} + V_{13} + V'_{12} = 0.855\text{V}$$

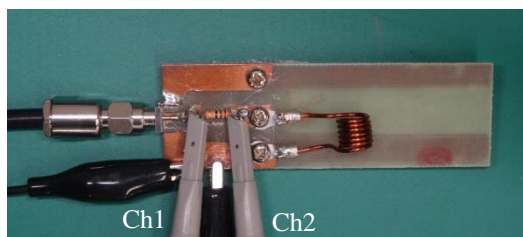
$$\cong (10+10)/(50+10+10) \times 3\text{V} = 857\text{mV}$$



$$\text{Ch2} = V_{13} + V'_{12} = 0.42\text{V} \cong (10)/(60+10) \times 3\text{V} = 429\text{mV}$$

$$\text{Ch3} = V'_{12} = 0.42\text{V} \cong (10)/(60+10) \times 3\text{V} = 429\text{mV}, \text{Ch1} - \text{Ch2} = V_{14} - (V_{13} + V'_{12}) = 0.435\text{V} \cong 429\text{mV}$$

問 1-(7)



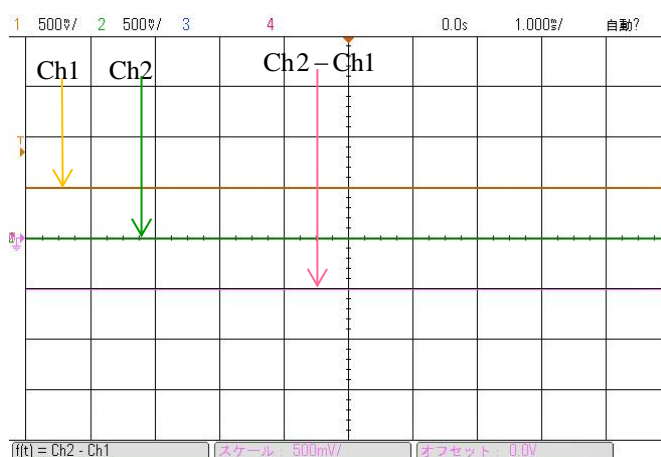
$$L \cong 0.44\mu\text{H}$$

直流(DC)なので L の両端の電圧 V_{15} は 0V

$$\text{Ch1} = -V_{16} + V_{15} = (10/60) \times 3\text{V} = 0.5\text{V}$$

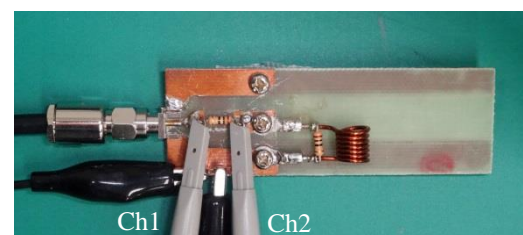
$$\text{Ch2} = V_{15} = 0\text{V}$$

$$\text{Ch2} - \text{Ch1} = V_{16} = V_{15} - 0.5 = -0.5\text{V}$$



V : 500mV/ H : 1.000ms/

問 1-(8)



$$R \cong 10\Omega \quad L \cong 0.47\mu\text{H}$$

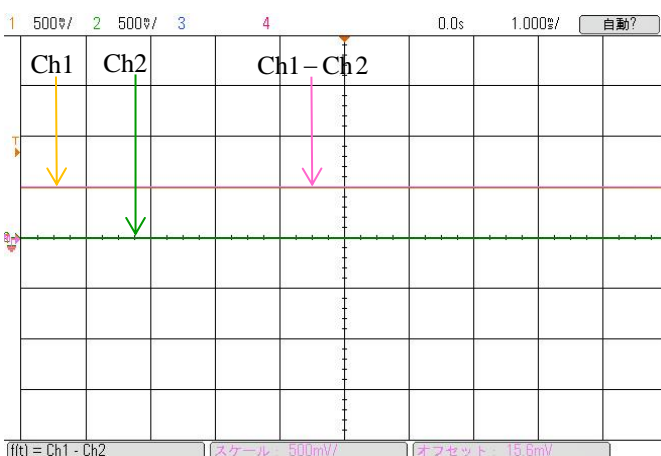
直流(DC)なので L の両端の電圧は 0V

従って

$$\text{Ch1} = V_{18} + V_{17} = (10/60) \times 3\text{V} = 0.5\text{V}$$

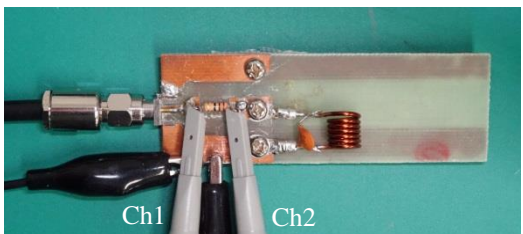
$$\text{Ch2} = V_{17} = 0\text{V}$$

$$\text{Ch2} - \text{Ch1} = V_{18} = 0.5\text{V} \text{ (グラフ上、Ch1 と重なっている)}$$



V : 500mV/ H : 1.000ms/

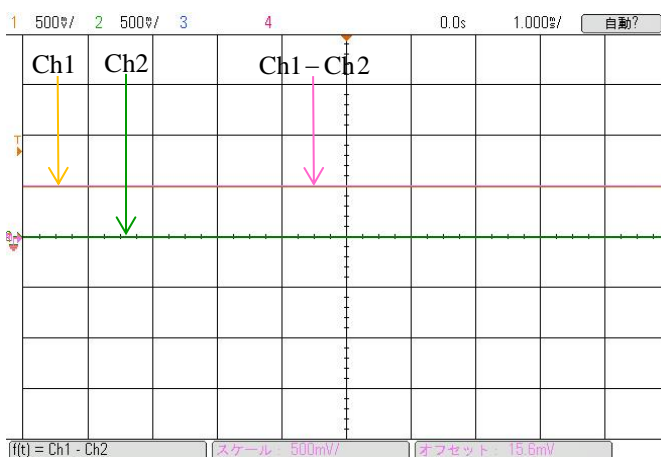
問 1-(9)



$$C \cong 72\text{pF} \quad L \cong 0.48\mu\text{H}$$

直流(DC)なので L の両端の電圧 V_{19} は 0V

従って



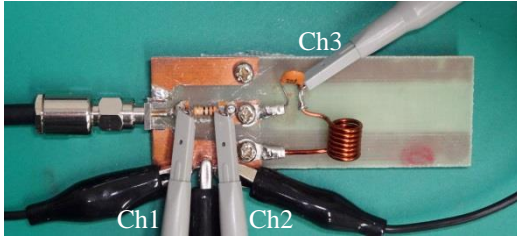
$$\text{Ch1} = V_{20} + V_{19} = (10/60) \times 3V = 0.5V$$

$$\text{Ch2} = V_{19} = 0V$$

$$\text{Ch2} - \text{Ch1} = V_{20} = 0.5V \text{ (グラフ上、Ch1 と重なっている)}$$

$$V : 500\text{mV/} \quad H : 1.000\text{ms/}$$

問 1-(10)



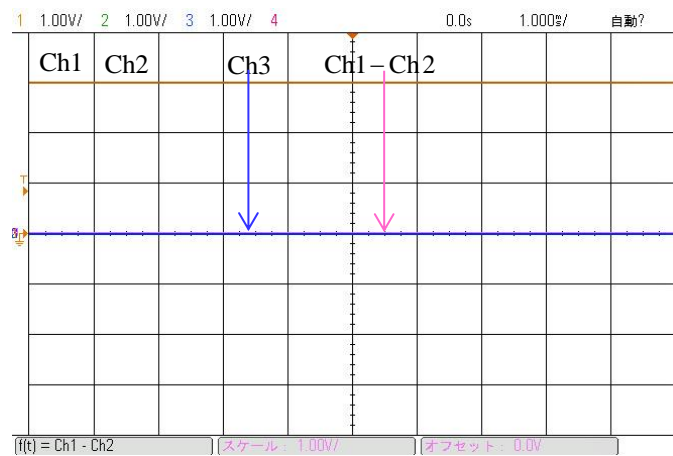
$$C \cong 72\text{pF} \quad L \cong 0.47\mu\text{H}$$

直流(DC)なので L の両端の電圧 V'_{21} (Ch3) は 0V

キャパシタに電流は流れず開放と等価。

$$\text{従って、Ch1} = V_{23} + V_{21} = 3V$$

$$\text{Ch2} = V_{21} = V_{22} + V'_{21} = 3V, \quad \text{Ch1} - \text{Ch2} = V_{23} = 0V \text{ (グラフ上、Ch3 と重なっている)}$$

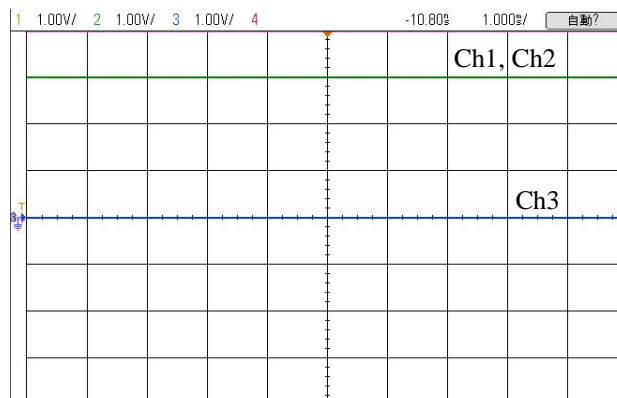
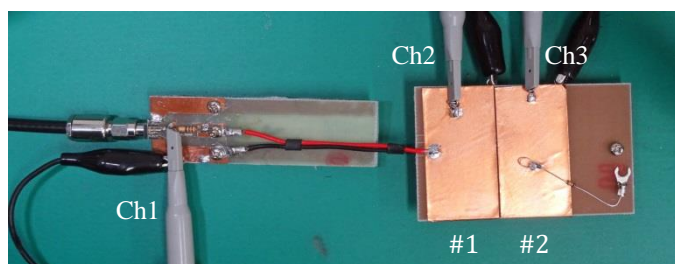


$$V : 1.00V/ \quad H : 1.000\text{ms/}$$

2. 回路素子と電磁界

課題 1：キャパシタンスどうしの電界結合

2 枚の**パッチ間の容量**について実験を通して考察します。この試料は、図 3.11 と図 3.12 でステップ応答の実験にも使用します。



注：パッチ#2 に抵抗が接続されています。これをネジ止めするとパッチ#2 は抵抗を通して GND (グラウンド)に落とされることになります。

信号源電圧は 3V です。オシロスコープのプローブを当てて測定すると、Ch1 と Ch2 の電圧は 3V、Ch3 の電圧は 0V になっています。(グラフ上で Ch1 黄色と Ch2 緑色は重なっています)

注：パッチの自己キャパシタンス(C_{1g} , C_{2g})は約 10pF、相互キャパシタンス C_m は約 0.4pF ですので、図の電圧源(e_g)が 3V であれば、キャパシタ#2 の電圧は $\{C_m / (C_{2g} + C_m)\} \times e_g = \{0.4 / (10 + 0.4)\} \times 3 = 0.12V$ でなければなりません。(テキスト図 3.11 の等価回路を参照してください。)

約 0.12V を示すはずなのに 0V を示している理由は、プローブのインピーダンスが無限大ではなく約 10M Ω であるため、コンデンサに蓄積した電荷がこのインピーダンスを通して放電してしまう(GND に落とされる)からです。この問題は、テキストの図 3.11 と図 3.12 の実験でも検討します。

3. 交流での電磁界と回路素子

任意波形は正弦波の集まり — FFT による矩形波パルスの周波数スペクトル表示 —

電圧・電流が時間的に変化するとき、これらを交流といいます。どのような形状をした(時間領域)波形であっても多くの周波数スペクトル(周波数領域)成分をもつ正弦波の集合で表現することができます。

時間領域とは横軸を時間で表示するものです。時間領域の波形は**オシロスコープ**で観測することができます。周波数領域とは、横軸を周波数で表示するものであり、周波数スペクトル成分を観測する機器は**スペクトラムアナライザ**と呼ばれます。最近の演算機能を持つオシロスコープ(本実験で用いている Keysight Technology DSO-X 2024A を含む)には、FFT で演算したスペクトルを表示する機能がついています。ここでは、FFT 機能を用いて矩形波パルスの周波数スペクトルを表示する実験を行います。

注：FFT とは Fast Fourier Transform (高速フーリエ変換)の略称であり、時間関数で表現される波形(時間領域)を周波数スペクトル成分(周波数領域)で表現する変換手法であるフーリエ変換を高速に演算処理する方法です。また、周波数領域の表現を時間領域の表現に変換する手法は逆フーリエ変換(IFFT : Inverse Fast Fourier Transform)と呼ばれます。

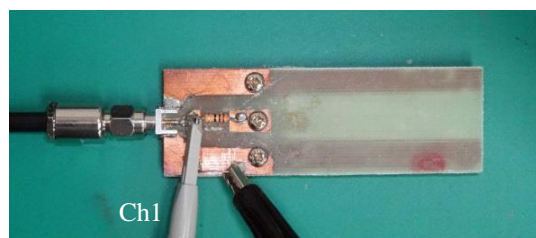
・波形発生器の設定

波形発生器の Waveform から Square(矩形波)を選びます。(マニュアルの P.8 参照)

Parameters のソフトキーから Duty Cycle(デューティ・サイクル)を選び、ノブを回してデューティ・サイクルを設定します。(デューティ・サイクルが 50%のとき、理想的には偶数次高調波はありませんが、50%以外の場合には偶数次高調波の生じることを確認できます。)

Amplitude を 1Vpp、Offset(オフセット)を 0V、Frequency を 100kHz に設定してオシロスコープでスペクトルを観測します。

下図のように信号供給用治具を介して信号発生器出力をオシロスコープの Ch1 に接続します。



FFT の測定回路

・オシロスコープの設定

矩形波に対するオシロスコープの垂直軸を 500mV/ に設定します。

矩形波の水平軸(時間軸)は 2.000μs/ と 200.0μs/ に設定した場合の測定を行います。

矩形波のデューティ・サイクルを 50%、25%、10%に設定した場合の測定を行います。

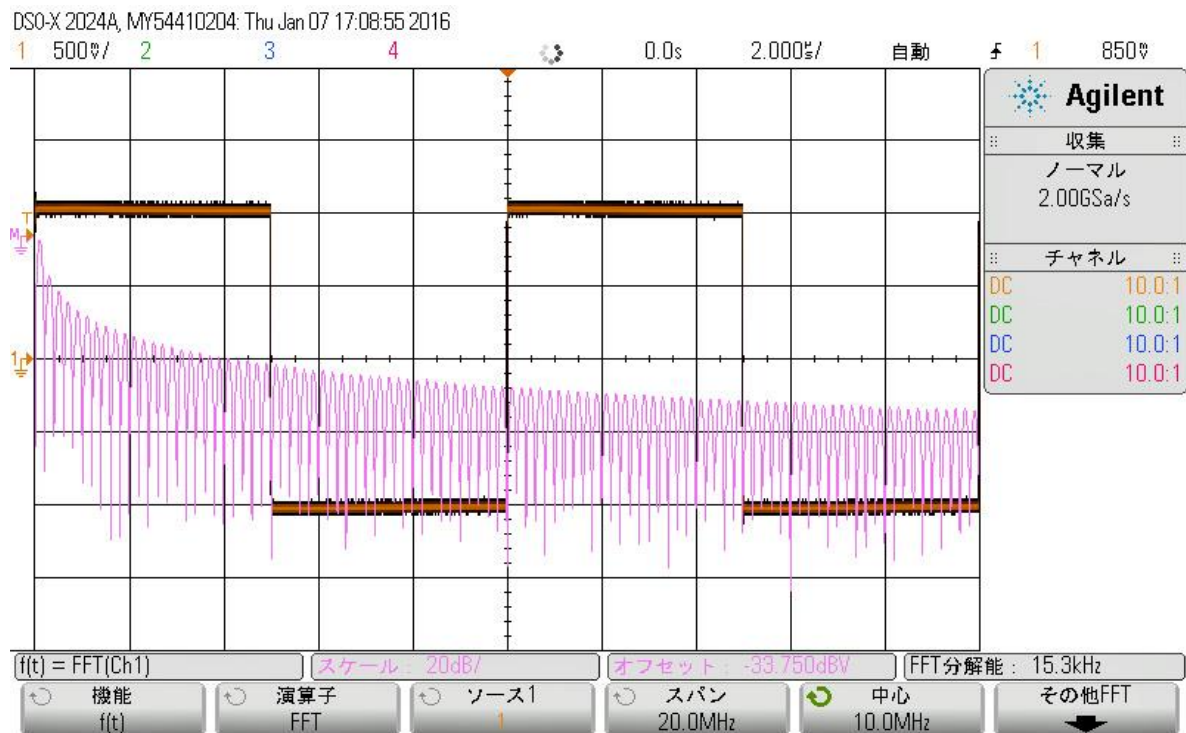
FFT を測定するために Math ボタンを押して、ソフトキーの「演算子」から FFT を選びます。

測定する周波数のスパンと中心周波数を設定します。スパンと中心周波数については、次ページに示す実験例のグラフの下に表示されている値を参照してください。

詳細はマニュアルの p.15 を参照してください。

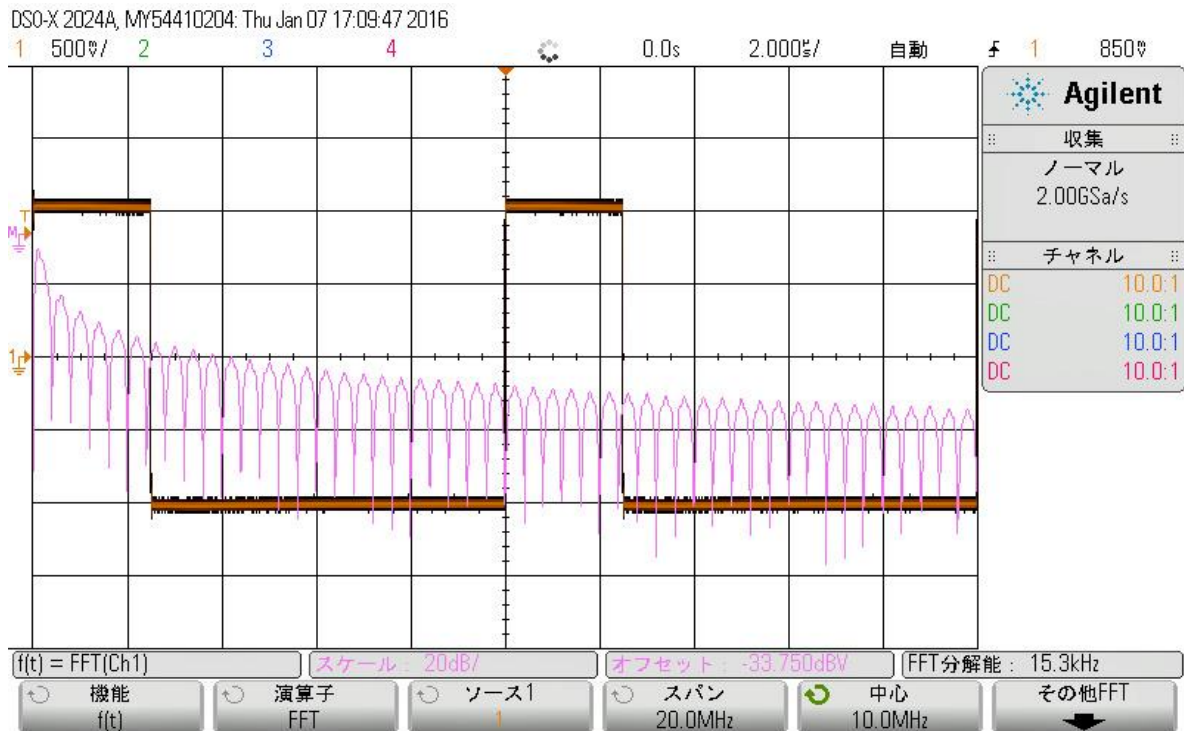
注：FFT を測定する場合には、[アベレージング]機能を使用せず[ノーマル]モードを選択します。

・デューティ・サイクル 50%、FFT 分解能 15.3kHz のとき



(a) 基本波周波数: 100kHz Duty Cycle: 50% H: 2.00us/ サンプリング: 2.00GSa/s

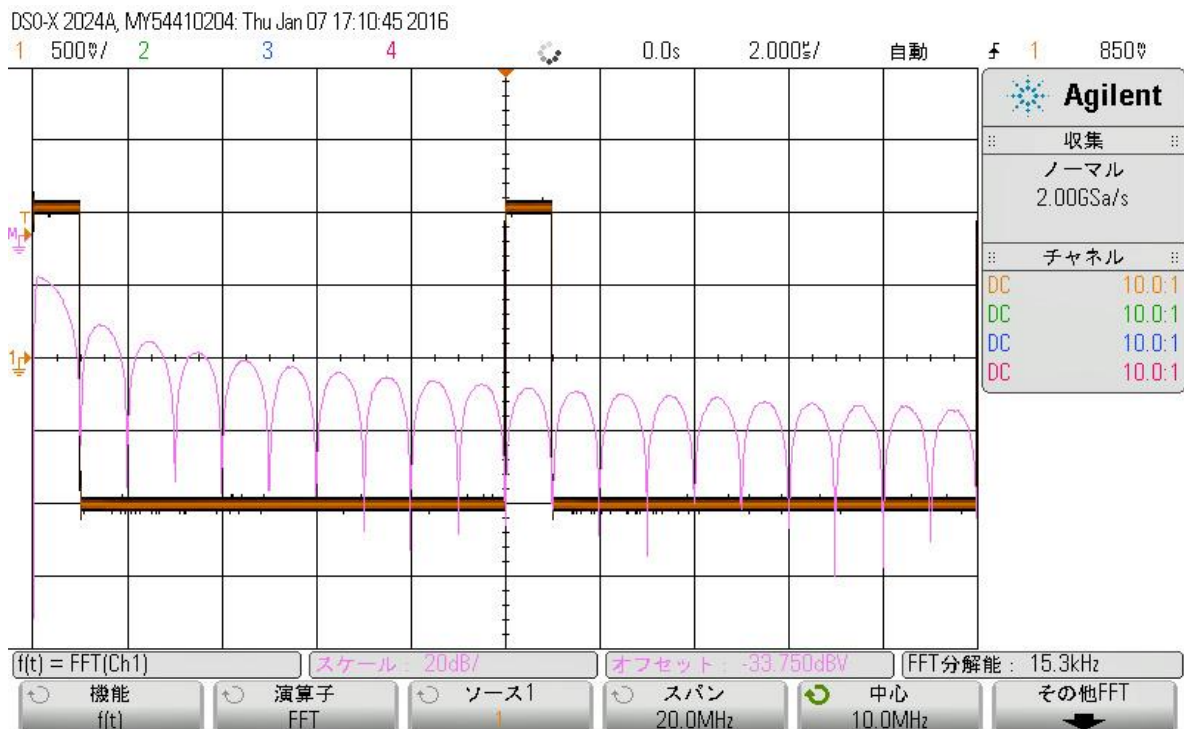
・デューティ・サイクル 25%、FFT 分解能 15.3kHz のとき



(b) 基本周波数: 100kHz Duty Cycle: 25% H: 2.00us/ サンプリング: 2.00GSa/s

分解能が低いためエンベロプ表示になっています。下図の(e)に高分解能の場合を示します。

・デューティ・サイクル 10%、FFT 分解能 15.3kHz のとき



(c) 基本周波数: 100kHz Duty Cycle: 10% H: 2.00us/ サンプリング: 2.00GSa/s

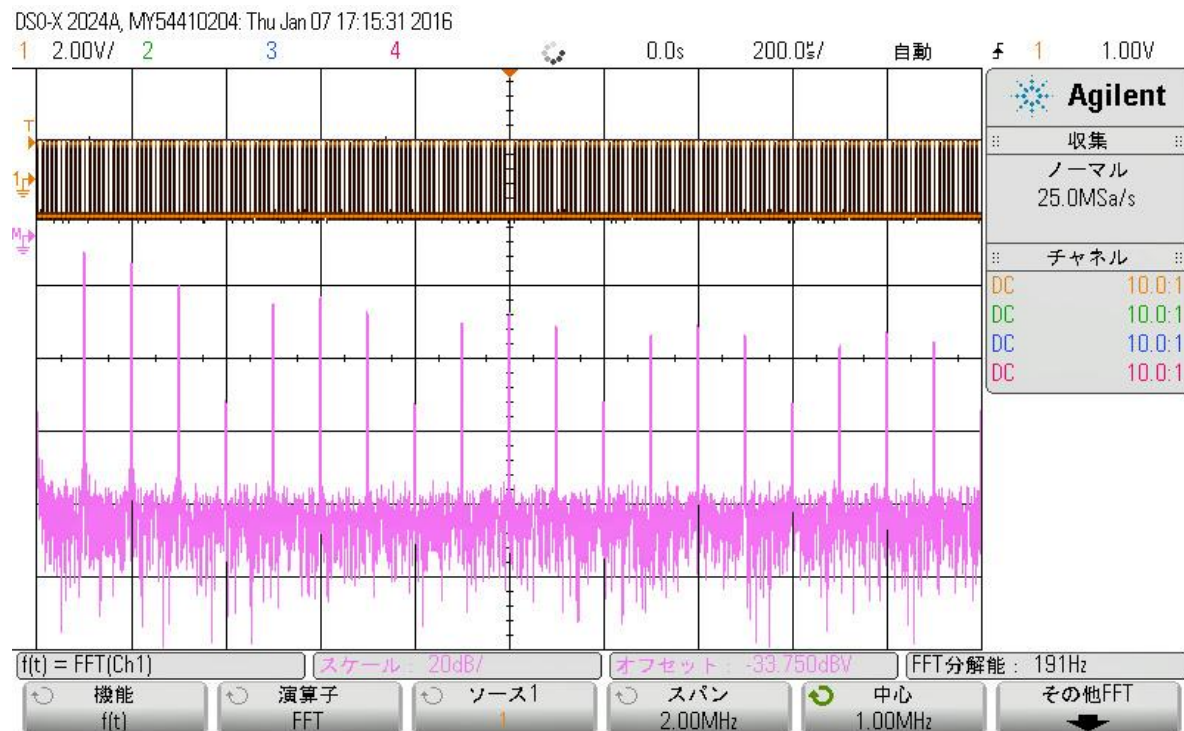
分解能が低いためエンベロプ表示になっています。下図の(f)に高分解能の場合を示します。

・デューティ・サイクル 50%、FFT 分解能 191Hz のとき



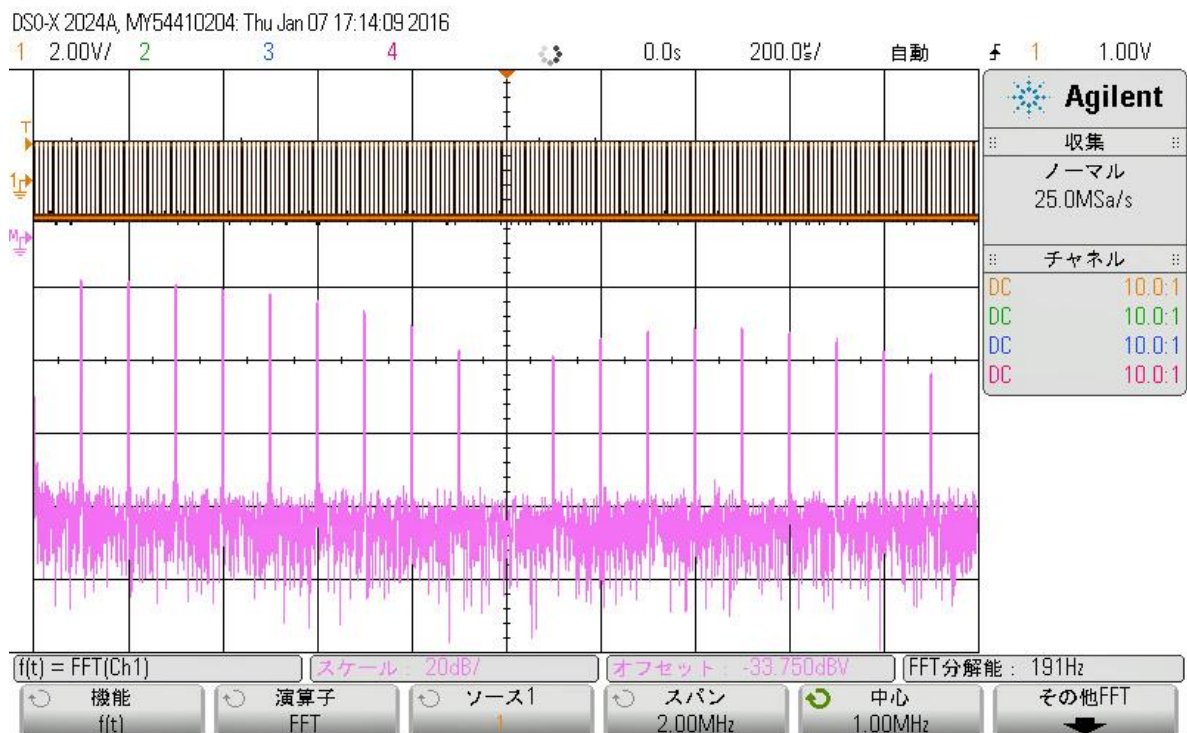
(d) 基本周波数: 100kHz Duty Cycle: 50% H: 200.0us/ サンプリング: 25.0MSa/s
奇数次高調波のみ存在します。

・デューティ・サイクル 25%、FFT 分解能 191Hz のとき



(e) 基本周波数: 100kHz Duty Cycle: 25% H: 200.0us/ サンプリング: 25.0MSa/s
偶数次高調波が現れ、第4次とその倍数次高調波が小さく(理想的にはゼロ)になっています。

・デューティ・サイクル 10%、FFT 分解能 191Hz のとき



(f) 繰り返し周波数 : 100kHz Duty Cycle : 10% H : 200.0us/ サンプルング : 25.0MSa/s
偶数次高調波が現れ、第 10 次とその倍数次高調波が小さく(理想的にはゼロ)なっています。

課題 2 : 抵抗回路の周波数特性

10Ω の抵抗を 3 個直列接続します。抵抗端における電圧を比較すると低周波(30KHz)では位相差が見られませんが、高周波(30MHz)になると位相差が観測されます。

下図(a)は 3 個の抵抗を直列接続した回路の実装状態を示しています。図(b)は図(a)の回路のモデル図で、各抵抗の端点の電圧を図のように定義します。実験では 30kHz と 30MHz における各点の電圧を測定します。30kHz では位相差が観測されませんが、30MHz では位相差が観測されることを確認します。

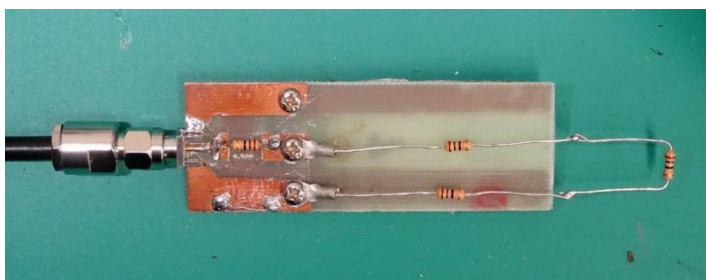


図 (a)

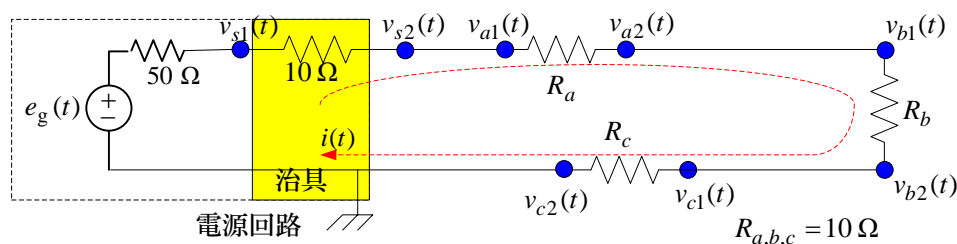


図 (b)

・波形発生器の設定

[Waveforms]ボタンを押して表示されるソフトキーのWaveformメニューの[Sine]を押して正弦波を選びます。ソフトキーメニューの[Frequency]で周波数を設定します。テンキーまたはノブで周波数の値を設定し、ソフトキーで単位を設定します。

[Amplitude]で振幅を設定します。テンキーまたはノブで振幅値を設定しソフトキーで単位を設定します。(ここでは1Vppに設定します。開放電圧は2Vppであることに注意してください。)

・オシロスコープの設定

垂直スケールノブを調整して 200mV/に設定します。

設定周波数に応じて水平スケールノブを調整します。(ここでは 30kHz のとき 5μs/、30MHz のとき 5ns)

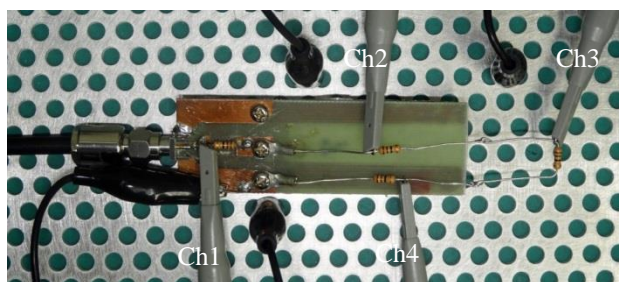
電流を測定するため抵抗 R_a の両端電圧 $v_{a1}(t)$ と $v_{a2}(t)$ の差分を求める場合のスケールは 60mV/に設定します。なお、表示を簡潔にするため「Ch1 の電圧($v_{ch1}(t)$)」を「Ch1」と略記する場合があります(他のチャンネルも同様)。

実験ではプローブのチャンネル数や波形の見やすさを考慮し、次の 3 つの場合に分けて 30kHz と 3MHz における波形を観測します。

- (1) $v_{s1}(t)$, $v_{a1}(t)$, $v_{b1}(t)$, $v_{c1}(t)$ の測定、(2) $v_{s1}(t)$, $v_{a2}(t)$, $v_{b2}(t)$, $v_{c2}(t)$ の測定、(3) $v_{s1}(t)$, $v_{a1}(t)$, $v_{a2}(t)$, $v_{c1}(t)$, $v_{a1}(t) - v_{a2}(t)$ の測定

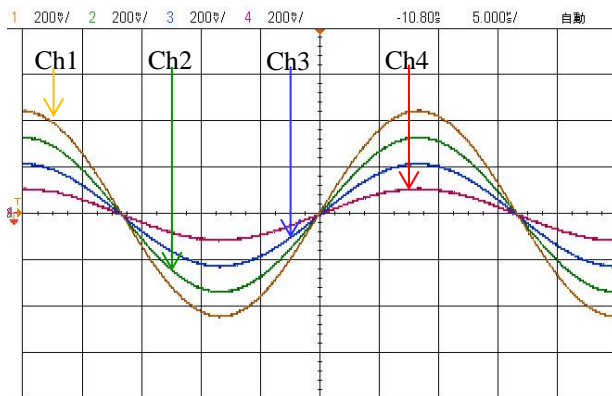
なお、3MHz において安定した波形観測を行うためにはオシロスコープのプローブを確実にグラウンドに落とす必要があるため、測定回路をアルミ板の上に置き、プローブのグラウンドをアルミ板に接続して実験します。

(1) $v_{s1}(t)$, $v_{a1}(t)$, $v_{b1}(t)$, $v_{c1}(t)$ の測定



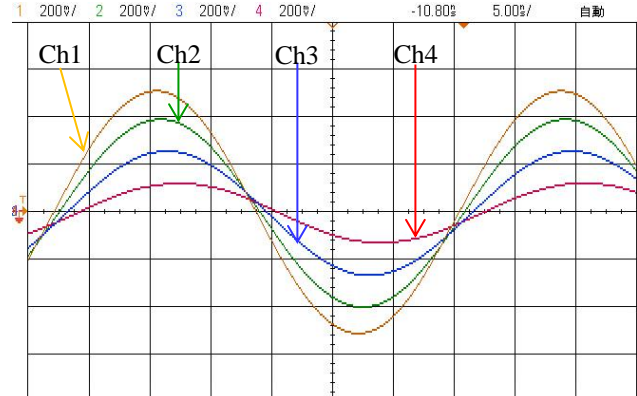
$$\text{Ch1} = v_{s1}(t), \text{Ch2} = v_{a1}(t), \text{Ch3} = v_{b1}(t), \text{Ch4} = v_{c1}(t)$$

測定回路(1)



30kHz

H: 5μs/



30MHz

H: 5ns/

上図の低周波(30kHz)の場合、抵抗端の電圧を比較すると位相差は見られずレベルだけが変化しています。従って、近似的にオームの法則が成り立っていると考えられます。回路図(b)より、電流 $i(t)$ 、Ch1 の電圧 $v_{s1}(t)$ 、Ch2 の電圧 $v_{a1}(t)$ 、Ch3 の電圧 $v_{b1}(t)$ 、Ch4 の電圧 $v_{c1}(t)$ は次のように求められます。

$$i(t) = e_g(t)/(50 + 10 + R_a + R_b + R_c) = (2V_{pp}/(50 + 10 + 10 + 10 + 10)\Omega) = 2V_{pp}/90\Omega \cong 22.2\text{mA}_{pp}$$

$$v_{s1}(t) = \{(10 + R_a + R_b + R_c)/i(t) = (40) \times i(t) = 40\Omega \times 2V_{pp}/90\Omega \cong 888\text{mV}_{pp}$$

$$v_{a1}(t) = (R_a + R_b + R_c) \times i(t) = 30\Omega \times 2V_{pp}/90\Omega \cong 666\text{mV}_{pp}$$

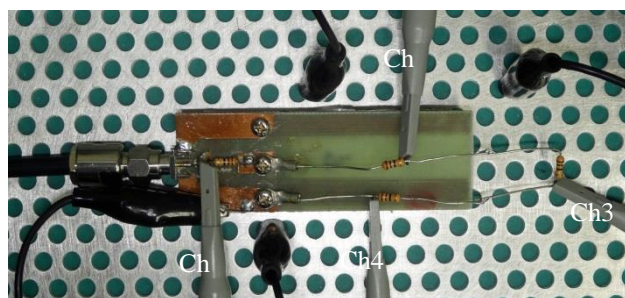
$$v_{b1}(t) = (R_b + R_c) \times i(t) = 20\Omega \times 2V_{pp}/90\Omega \cong 444\text{mV}_{pp}$$

$$v_{c1}(t) = (R_c) \times i(t) = 10\Omega \times 2V_{pp}/90\Omega \cong 222\text{mV}_{pp}$$

これらの値は上図(30kHz の場合)と一致しています。

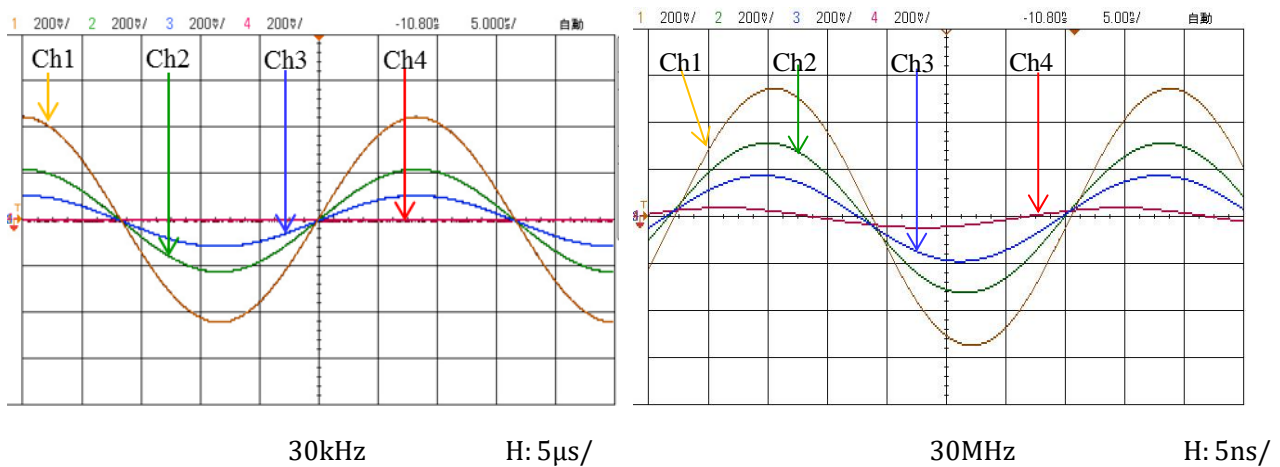
しかし、上図(d)の高周波(30MHz)になると電圧レベルが変化して $v_{s1}(t) \cong 1000\text{mV}_{pp}$ 、 $v_{a1}(t) \cong 800\text{mV}_{pp}$ 、 $v_{b1}(t) \cong 560\text{mV}_{pp}$ 、 $v_{c1}(t) \cong 260\text{mV}_{pp}$ となるとともに、 $v_{s1}(t)$ に対して位相遅れが生じています。この現象は、高周波交流では抵抗のリード線の長さ(リード線はインダクタンスを持つ)やリード線どうし、あるいはリード線とグラウンドの間のキャパシタンスが無視できなくなり、オームの法則が成り立たないことを示しています。この例では、リード線のインダクタンス(L)の影響が支配的です。インダクタンスにはテキスト「3.4 交流でのインダクタの動作」で説明されるように「電圧が電流より位相が 90° 進む」という性質があるため、この例のように回路上の電圧波形に位相差が生じることになります。

(2) $v_{s1}(t)$, $v_{a2}(t)$, $v_{b2}(t)$, $v_{c2}(t)$ の測定



$$\text{Ch1} = v_{s1}(t), \text{Ch2} = v_{a2}(t), \text{Ch3} = v_{b2}(t), \text{Ch4} = v_{c2}(t)$$

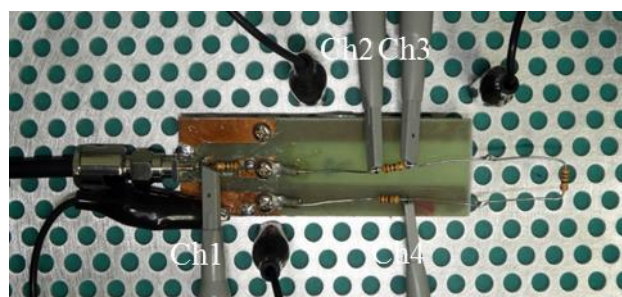
測定回路(2)



この場合も 30kHz ではオームの法則に従った電圧配分が行われています。 $v_{c2}(t)$ を測定する点は回路図上でグラウンドに接続されているのでオームの法則に従えば 0V になるはずであり、上記のグラフでも Ch4 は 0V を示しています。

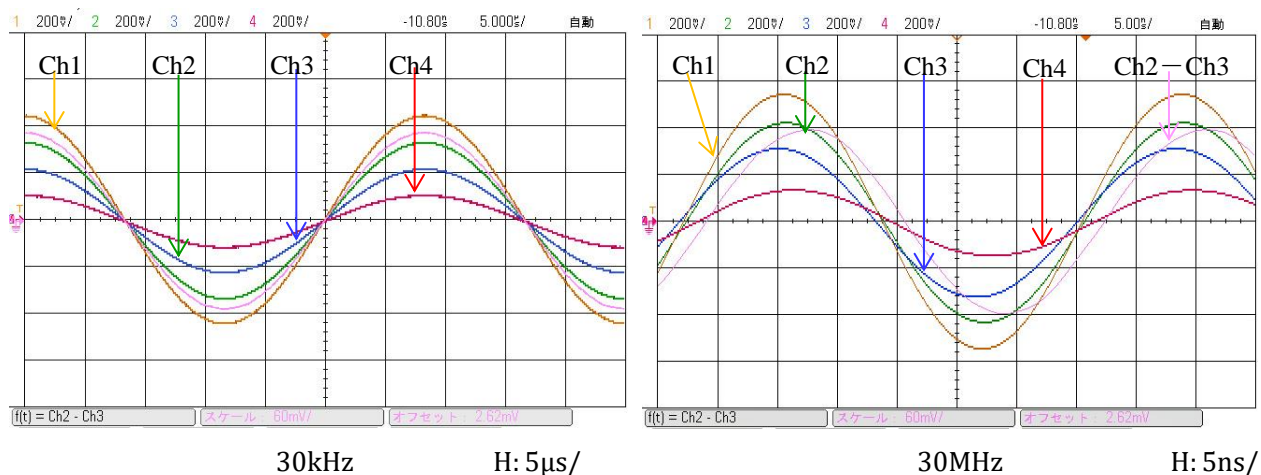
しかし、30MHz では(1)の場合と同様に電圧波形に位相差が観測されます(この場合 $v_{s1}(t)$ に対して位相が進んでいることに注意してください)。特に、注目すべき点はCh4の電圧 $v_{c2}(t)$ が 0V ではなく 80mV_{pp}を示していることです。これは、 R_c とグラウンドとの間をつなぐリード線がインダクタンスを持っているためと考えることができます。高周波ではリード線の長さを無視することができなくなることを確認してください。

(3) $v_{s1}(t)$, $v_{a1}(t)$, $v_{a2}(t)$, $v_{c1}(t)$, $v_{a1}(t) - v_{a2}(t)$



$$\text{Ch1} = v_{s1}(t), \text{Ch2} = v_{a1}(t), \text{Ch3} = v_{a2}(t), \text{Ch4} = v_{c1}(t)$$

測定回路(3)



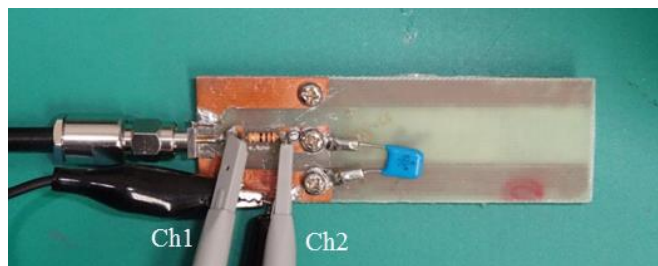
ここでは電流波形を観測します。図(b)で示したように回路を流れる電流 $i(t)$ はどの抵抗においても一定なので、抵抗 R_a の両端の電圧から求めます。Ch2 の電圧 $v_{a1}(t)$ と Ch3 の電圧 $v_{a2}(t)$ の差を抵抗 R_a で割ると $(v_{a1}(t) - v_{a2}(t))/R_a = i(t)$ として電流を求めることができます。波形表示グラフの $v_{a1}(t) - v_{a2}(t)$ は電流 $i(t)$ に抵抗 R_a を掛けた値を示しています。

3kHz では電圧と電流は同位相ですが、30MHz になると電流の位相はCh1 の $v_{s1}(t)$ を基準と考えて約 30° 遅れています、また電流レベルもやや大きくなっています。

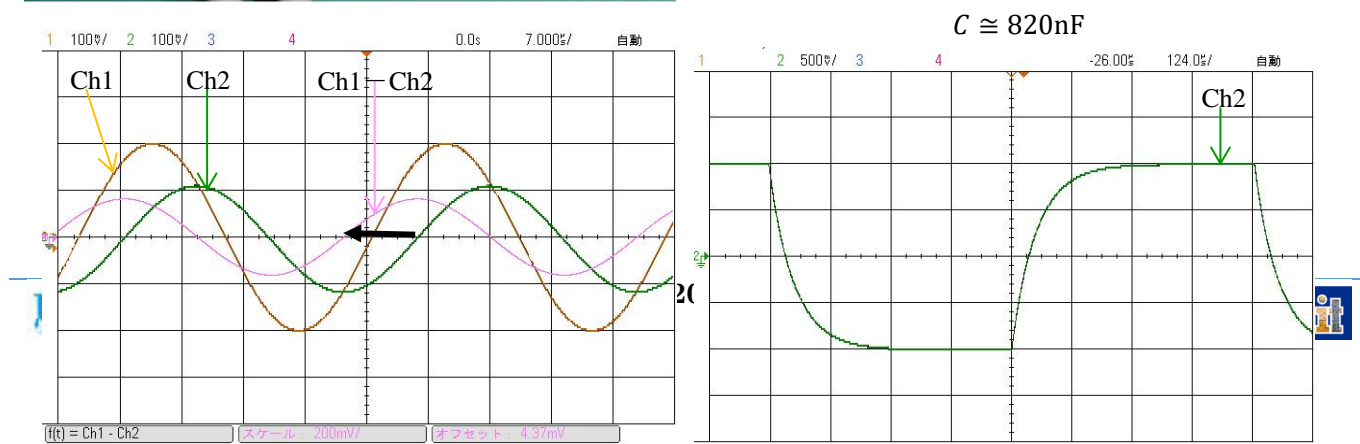
図 3.8 : 交流でのキャパシタの動作

この実験の**第1の狙い**は、「キャパシタを流れる交流電流は電圧より位相が 90° 進んでいる」ことを示すことです。この例題では、 10Ω の抵抗と約 820nF のキャパシタが直列接続されています。 10Ω の抵抗の両端の電圧を測定し抵抗値(10Ω)で割れば電流が得られます。次ページの正弦波応答で薄紫色に表示されているグラフが、Ch1 の電圧と Ch2 の電圧の差で、これを 10Ω で割った値が電流です。

課題2の場合と同様に信号源から 30kHz の正弦波交流を加えると抵抗両端の波形 $v_{cr}(t)$ (これを抵抗値 10Ω で割った値が電流)の位相がキャパシタ両端の波形 $v(t)$ よりも 90° 進んでいることが観測されます。これは、テキストの図 3.7(a)に示された「時間変化する電圧とキャパシタの関係」において電圧波形が \sin 関数であれば電流波形は時間微分した \cos 関数になることから理解できます。



左図のようにキャパシタ($C \cong 820\text{nF}$)を信号供給用治具に取り付けて、抵抗(10Ω)の両端に Ch1 と Ch2 のプローブを装着します。



正弦波応答(30kHz) (H : 7.000 μ s/)

矩形波応答(1kHz) : 積分波形 (H : 124.0 μ s/)

この実験の第2の狙い

は、この回路が RC 積分回路になっていることを示すことです。波形発生器から矩形波パルスを加えます。

・波形発生器の設定

[Waveforms]ボタンを押して表示されるソフトキーのWaveformメニューの[Square]を押して矩形波を選びます。ソフトキーメニューの[Frequency]で周波数を設定します。テンキーで周波数の値を設定してソフトキーで単位を設定します。(ここでは30kHz)

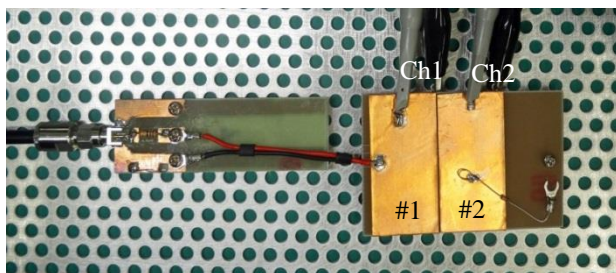
[Amplitude]で振幅を設定します。テンキーで振幅値を設定しソフトキーで単位を設定します。(ここでは1Vpp)

上図の右側が矩形波応答を示しています。キャパシタの両端に「積分波形」が得られます。(出力を開放にすると Ch1 に矩形波パルスが観測されますが、回路を接続した状態では矩形波にならないので、図には表示してありません。)

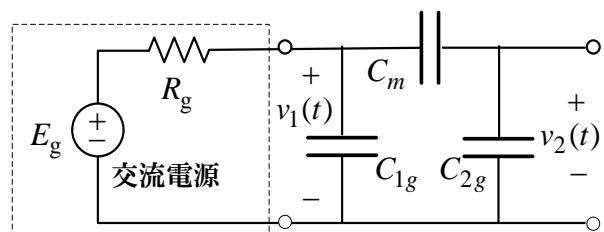
図 3.11 : 隣接する導体(パッチ)間の電界結合

課題 1 では直流信号源について実験しましたが、ここでは交流信号(正弦波および矩形波)に対する特性を調べます。図 3.11 の実験ではパッチ#2 に繋がっている抵抗 10k Ω は GND に接続されていません。パッチ #2 はどこにもつながっていないのに電界結合によって電圧波形が観測されます。

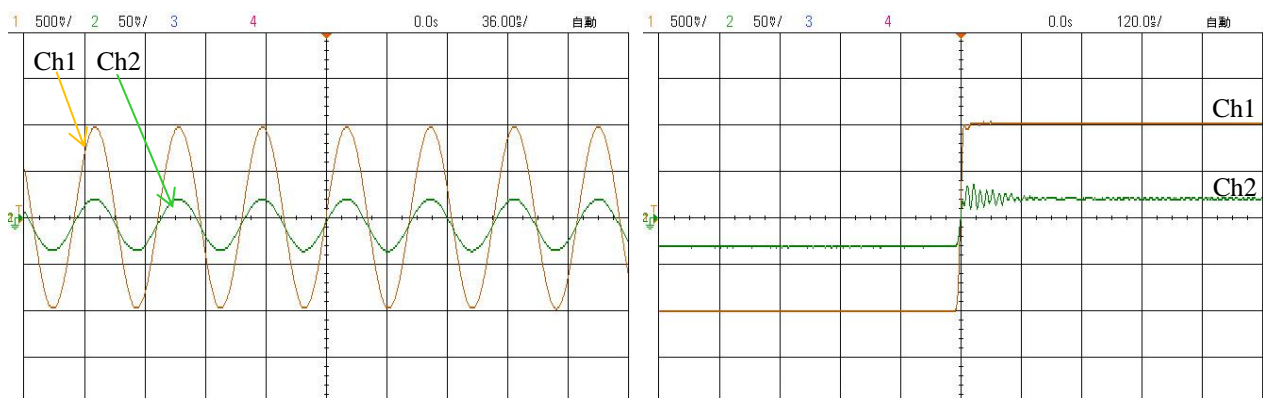
なお、安定したグラウンド状態を得るために測定回路をアルミ板の上に置いて実験します。



(a) 2 個の隣接する導体板



(b) 等価回路表現



正弦波応答(20MHz) (H : 36.00ns/)

(c) 正弦波電源での電圧測定結果

矩形波応答(20kHz) (H : 120.0ns/)

(d) ステップ電圧源での電圧測定結果

パッチの自己キャパシタンス(C_{1g}, C_{2g})は約 10pF、相互キャパシタンス C_m は約 0.4pF です。相互誘導(電界結合)によって Ch2 のプローブが接続されているパッチ#2 に電圧が発生しています。

図(c)は正弦波電源のときであり、入力電圧 $v_1(t)$ と出力電圧 $v_2(t)$ とは、大きさは異なりますが位相は同じ(同相)であることが分かります。図(d)はステップ電圧源での観測結果です。立ち上がりから暫くの間はほぼ一定の値になることを示していますが、これは直流電圧を加えたときの電圧に対応しています。

注：1msec 程度の時間が経過すれば、次に実験する図 3.12 の場合に抵抗(10k Ω)を通して放電するのと同様にプローブのインピーダンス(約 10M Ω)を通した放電のため 0V になります。例えば、矩形波の繰り返し周波数を 100Hz、水平時間軸を 200 μ s/に設定すると放電波形を観測することができます。

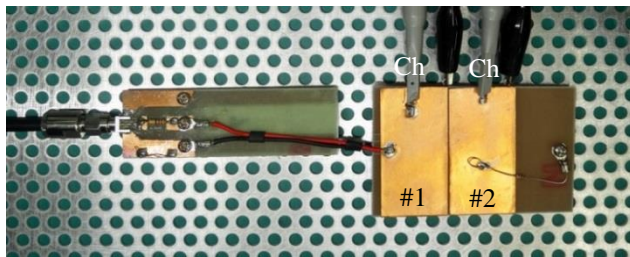
注：図(d)のステップ応答電圧の立ち上がり部分は振動波形となっています。この現象はリード線のインダクタンス等の影響によるものでリングングと呼ばれます。

図 3.12：抵抗による放電と導体(パッチ)間に指を置いた場合

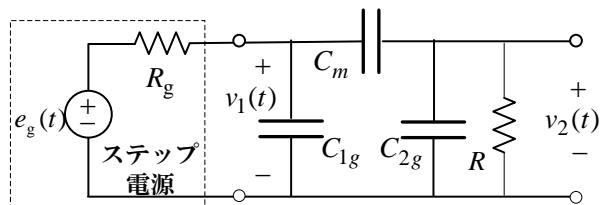
(1) パッチ#2 に抵抗(10k Ω)を並列接続した場合の矩形波応答 (抵抗による放電現象の確認)

(2) パッチ#1 とパッチ#2 の間に指を入れた場合の矩形波応答 (誘電体の効果の確認)

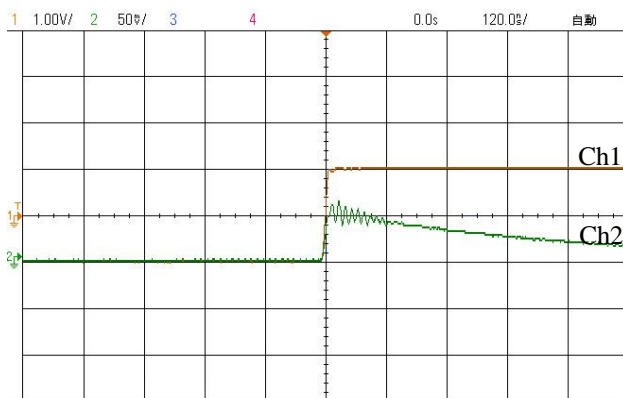
課題 1 や図 3.11 の場合と異なり、この実験ではパッチ#2 に抵抗($R \cong 10k\Omega$)が並列接続されていることに注意してください。



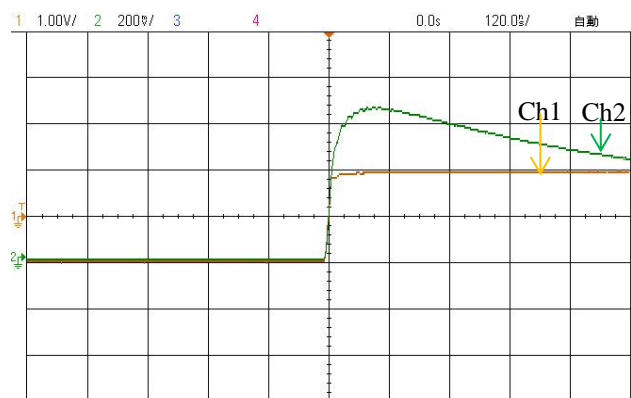
(a)



(b)



(c) 抵抗(10k Ω)による放電 (H : 120.0ns/)



(d) パッチの間に指を置いた場合 (H : 120.0ns/)

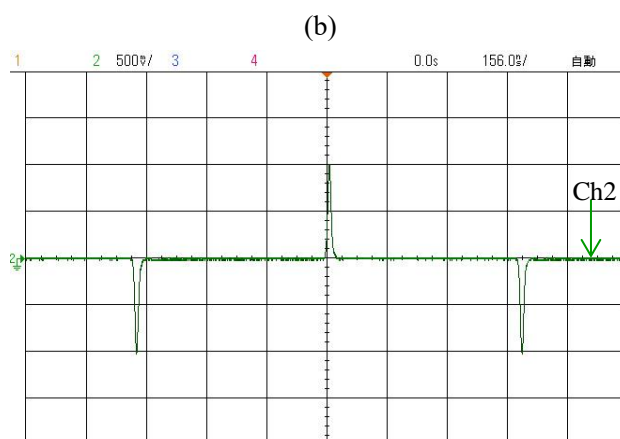
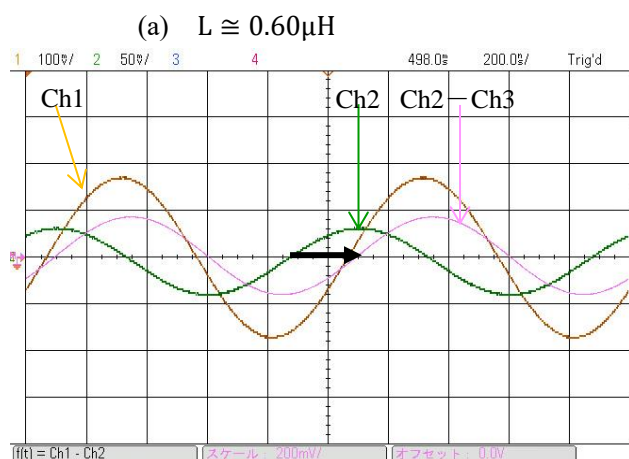
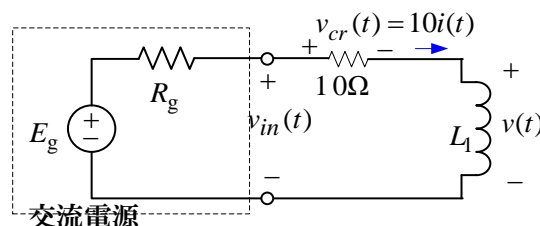
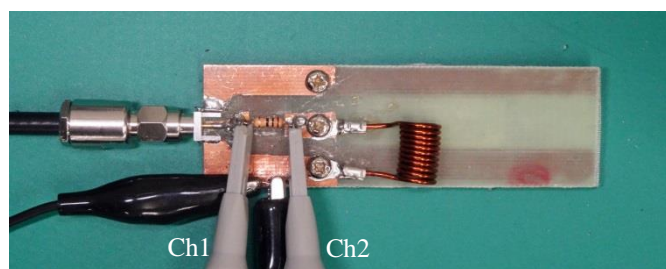
課題1で述べたように、パッチ#2に蓄積された電荷は抵抗を通して放電するので、電圧は上図(c)のように指数関数的に減衰します。この場合、抵抗値が(プローブのインピーダンスに比べて3桁ほど低い) $10\text{k}\Omega$ なので約 $1\mu\text{sec}$ の短い時間で減衰しています

指は誘電体なので、パッチ#1とパッチ#2の間に指を入れると、相互キャパシタンス(C_m)が大きくなり、インピーダンスが低くなるので、パッチ#2の電圧は増大します。Ch2の電圧レベルが指を入れない場合 (50mV) に比べて大きくなっている (200mV) ことに注目してください。パッチ#2の電荷は抵抗を通して放電するので最終的には 0V になります。

図 3.14 : 交流でのインダクタの動作

この実験の**第1の狙い**は、「インダクタを流れる交流電流は電圧より位相が 90° 遅れている」ことを示すことです。この例題では、 10Ω の抵抗と約 $0.60\mu\text{H}$ のインダクタが直列接続されています。 10Ω の抵抗の両端の電圧を測定し抵抗値(10Ω)で割れば電流が得られます。下図(c)の正弦波応答で薄紫色に表示されているグラフが、Ch1の電圧とCh2の電圧の差で、これを 10Ω で割った値が電流です。

信号源から 1MHz の正弦波交流を加えると抵抗両端の波形 $v_{cr}(t)$ の位相がキャパシタ両端の波形 $v(t)$ よりも 90° 遅れていることが観測されます。これは、テキストの図 3.13(b)に示された「時間変化する電圧とインダクタの関係」において電流波形が \sin 関数であれば電圧波形は時間微分した \cos 関数になることから理解できます。



(c) 正弦波応答(1MHz) (H : $200.0\text{ns}/$)

(d) 矩形波応答(1MHz) : 微分波形 (H : $156.0\text{ns}/$)

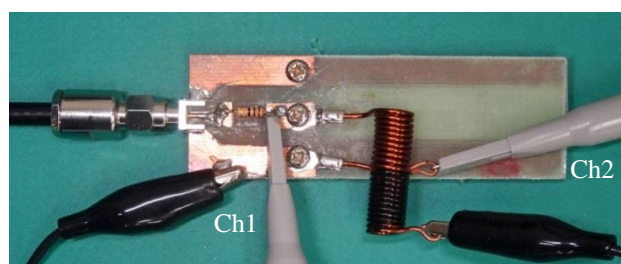
- この実験の**第2の狙い**は、この回路が RC 微分回路になっていることを示すことです。矩形波パルスを加えるとキャパシタの両端に「微分波形」が得られます。(出力を開放にすると Ch1 に矩形波パルスが

観測されますが、回路を接続した状態では矩形波にならないので、図には表示してありません。)

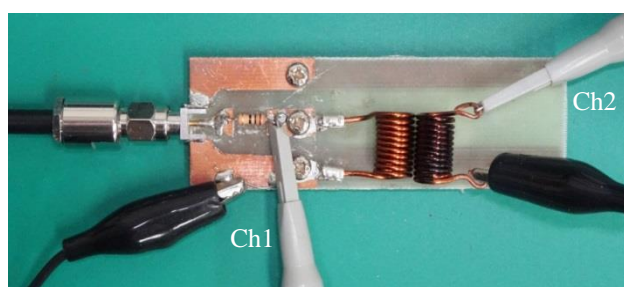
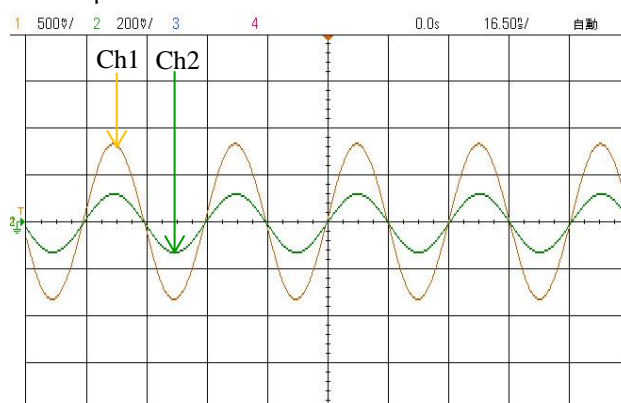
課題3：インダクタどうしの磁界結合

2個のコイルが近くにあるとき、一方のコイルに正弦波電圧を加えると、他方のコイルに電圧が発生します。線は接続されていないのに何故電圧が観測されるのか、コイルの配置の仕方によって観測波形が異なるのは、何故か考えてください。下記の写真のように信号供給用治具にコイル#1(茶色)を接続し、信号発生器から 30MHz、1Vpp の正弦波信号を供給します。コイル#1 に Ch2 のプローブで挟んだコイル#2(黒色)を近づけると、近づけ方によって Ch2 の電圧の大きさが異なります。

コイル#1(茶色) : $L \cong 0.60\mu\text{H}$ コイル#2(黒色) : $L \cong 0.66\mu\text{H}$

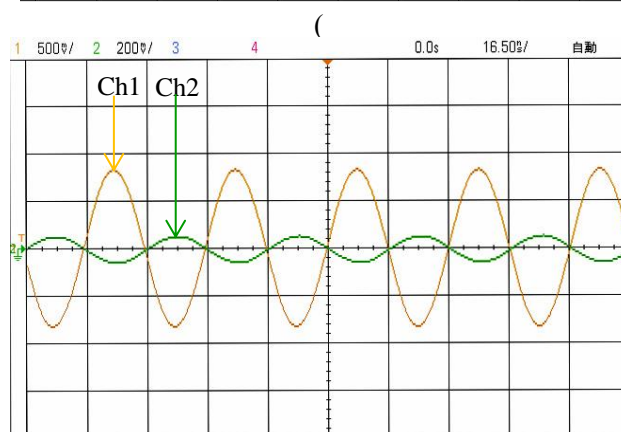


(a-1)

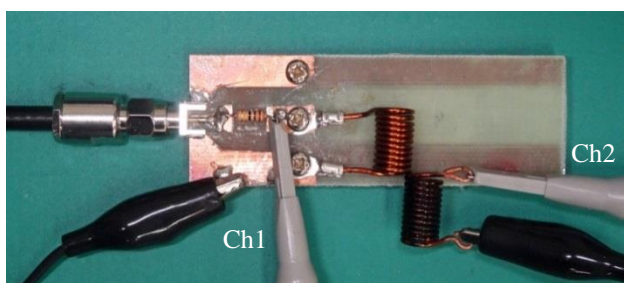


a-2) (H : 16.50ns/)

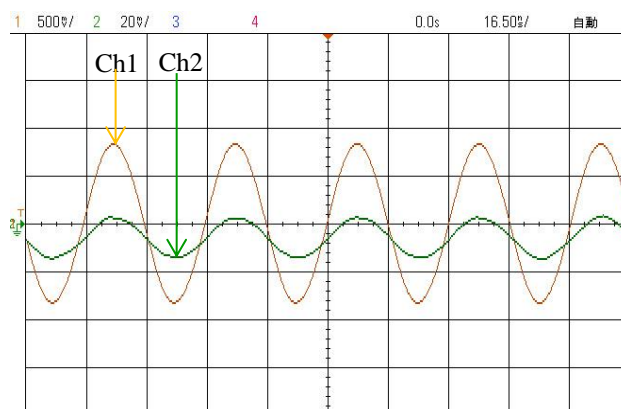
(b-1)



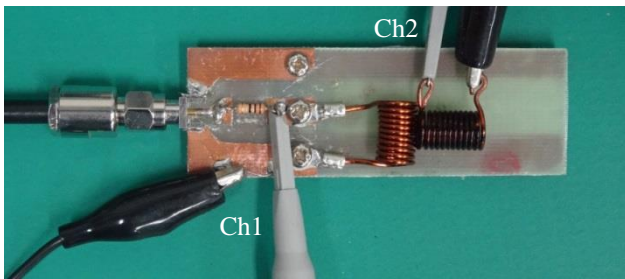
(b-2)



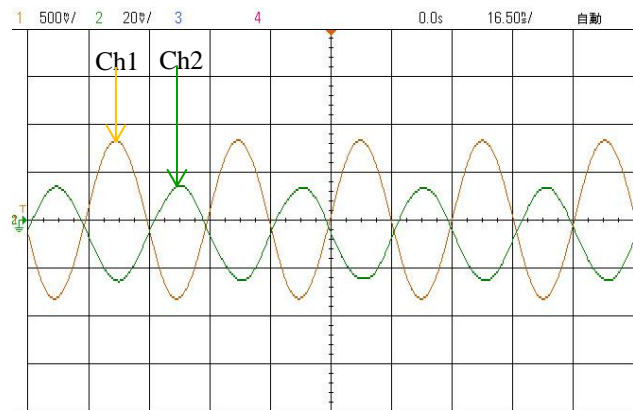
(c-1)



(c-2)



(d-1)



(d-2)

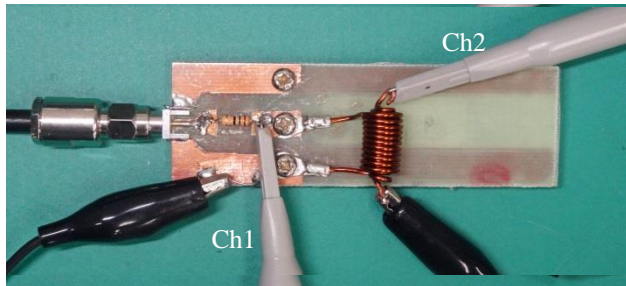
Ch1 はコイル#1(茶色)の両端の電圧、Ch2 はコイル#2(黒色)に発生する電圧を表しています。

この実験によって、コイルの配置の仕方によって結合状態が変わる様子が分かります。

30MHz の正弦波を加えたコイル#1(茶色)にオシロスコープのプロブで挟んだ別のコイル#2(黒色)を近づけると、磁界結合が生じて黒色のコイル#2 の両端に電圧が発生します。コイル#1 に発生した磁束がコイル#2 に結合する大きさは、コイルの配置(向き)によって異なります。結合の大きさは上図の(a)が一番大きく、(b)は(a)の約 1/2 程度になっており、(c)と(d)ではさらに小さくなっています(垂直スケールに注意してください)。コイル#1 とコイル#2 の位置の微妙なずれによってコイル#2 に発生する電圧は影響を受けますので、(c)と(d)の大小関係は参考程度に考えてください。

図 3.17 : インダクタの磁界結合 (結合するコイルが逆巻の場合、位相は反転する)

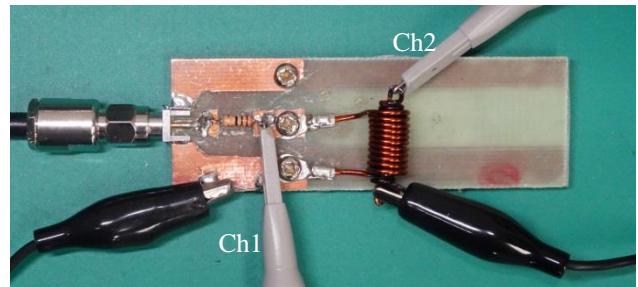
変成器 (トランス)の原理について実験します。



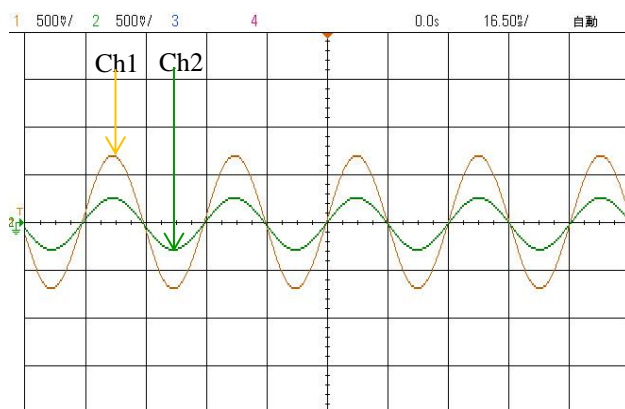
コイル大(#1) : $L \cong 0.63\mu\text{H}$

コイル大(#1) : $L \cong 0.63\mu\text{H}$

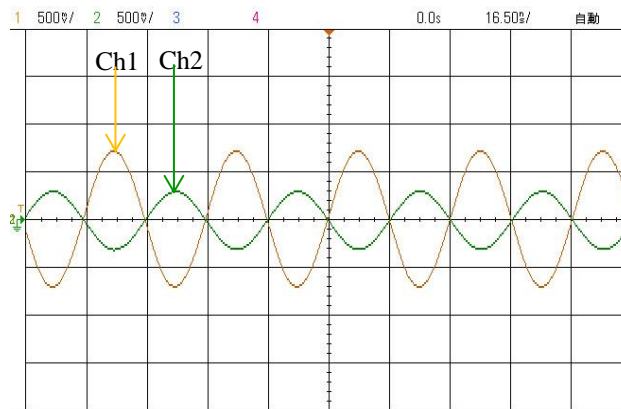
コイル小(#2) : $L \cong 0.65\mu\text{H}$



コイル小(#2) : $L \cong 0.62\mu\text{H}$ (黒色 : 逆巻)



(a) 誘導電圧が同相の場合



(b) 誘導電圧が逆相の場合

強い磁界結合を利用した回路素子は変成器 (トランス) と呼ばれます。この実験ではコイル#1 の中にコイル#2 を挿入した構成で変成器を模擬しています。上図(a)は巻線が同じ向き(同相)に巻かれた2つのコイルの両端の電圧を示しています。(b)は巻線が互に逆向き(逆相)に巻かれた2つのコイルの両端の電圧を示しています。これは観測端子を入れ替えることで実現することもできますが、ここでは入れ子構造にしたコイルの巻き方を逆にするによって実現しています。黒色のコイルが巻き方を逆にしたコイルです。

現実のトランスは、2つのコイルを重ね、そのコイルの中空部分に棒状のフェライトを入れたり、ドーナツ型のフェライトにコイルを巻きつけた構造になっています。

4. 交流での回路解析の手法

共振回路とは

インダクタンス L とキャパシタンス C が組み合わせられると共振回路が構成され、周波数 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ で共振します。共振には L と C が直列接続された場合に起きる直列共振と、並列接続された場合に起きる並列共振があります。直列共振状態では LC が直列接続されたインピーダンスは(理想的には)ゼロになり、並列共振状態では LC が並列接続されたアドミタンスは(理想的には)ゼロ、インピーダンスは(理想的には)無限大になります。

注：実際のインダクタンス(L)素子には等価直列抵抗や寄生キャパシタンスがあり、キャパシタンス(C)素子には等価直列抵抗や寄生インダクタンスが存在します。高周波ではインダクタンス素子やキャパシタンス素子は単体でも共振します。これを自己共振と言います。

この実験では、オシロスコープの周波数掃引機能を用いて、低周波領域から高周波領域にかけて周波数を変化させ、共振周波数における振幅の落ち込み(直列共振の場合)や振幅のピーク(並列共振の場合)を観測します。

周波数掃引特性を表示する方法

- ・ 波形発生器の設定

[Sweep]ボタンを押して Sweep を On にして、掃引タイプを Linear に設定します。

[Sweep Time]を 1sec(100msec/)、[Start Freq]を 100Hz、[Stop Freq]を 1MHz～30MHz の任意の値に設定します。

[Amplitude]を 1Vpp に設定します。

[Trigger]を押して表示される Trigger/Sync の最初の Source/Immed ソフトキーを押すと、トリガ・メニューが表示されますので、最初の Immed を選択すると連続的に波形を出力します。

・オシロスコープの設定

垂直軸：Ch1、Ch2、Ch3、Math の各チャンネルについて実験の説明に従って適宜調整します。

水平軸：100ms/ ([Sweep Time]を 1sec に設定したので、オシロスコープの横軸を左端から右端まで掃引するのに 1sec かかることになります。

掃引を止める時には[RUN/STOP]ボタンを押します。ボタンが赤くなり、掃引が停止します。もう一度押すとボタンは緑になり、掃引を開始します。[Single]ボタンを押すと、一度だけ掃引します。

注：周波数掃引と時間軸波形の表示を切り替えた時に、表示に不具合が生じる場合には、[Run/Stop]ボタンの下にある[Default Setup]を押して初期状態に戻すと復帰します。ただし、水平軸や垂直軸などを設定しなおす必要があります。

周波数掃引の実験では、[アベレージング]機能を使用せず[ノーマル]モードを選択します。

・外部トリガの設定

外部トリガによって掃引を開始すると安定した表示が得られます。

波形発生器の表面パネル右下の [Sync] と表示された BNC コネクタとオシロスコープの裏面パネルの右上の[EXT TRIG IN]と表示された BNC コネクタを同軸ケーブルで接続します。

オシロスコープの[Trigger]ボタンを押して、[ソース]と表示されたソフトキーで[外部]を選びます。

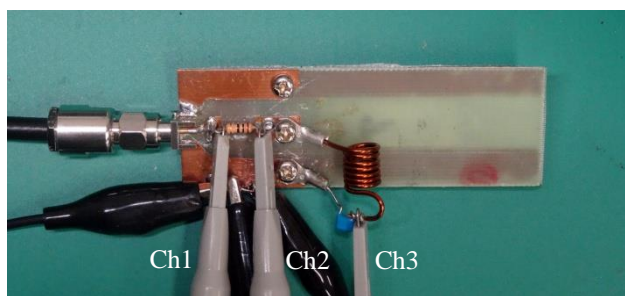
Trigger の[Level]設定用のノブで表示パネルの右上の電圧が約 2.00V になるように調整します。

[Mode Coupling]ボタンを押して[モード]ソフトキーで[ノーマル]を選びます。

水平位置調整用のノブで掃引開始が表示画面の左端から始まるように調整します。

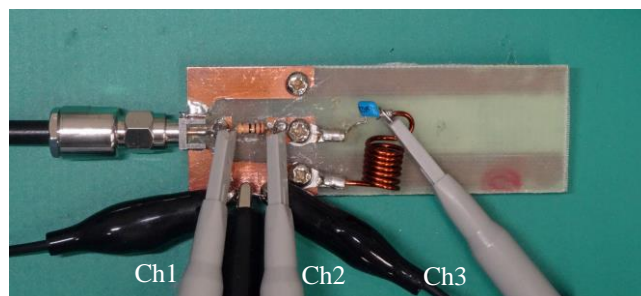
(1) 直列共振

直列共振回路の構成は 2 種類考えられます。下記の写真 1 のようにインダクタ(L)を抵抗側に、キャパシタ(C)を GND 側に接続する場合と、写真 2 のようにキャパシタ(C)を抵抗側に、インダクタ(L)を GND 側に接続する場合の 2 種類です。実験試料の測定治具への取り付け方によっていずれかの構成になります。ここでは、写真 1 の場合を「直列共振-1」、写真 2 の場合を「直列共振-2」と呼ぶことにします



$$L \cong 0.2\mu\text{H} \quad C \cong 0.26\mu\text{F} \quad f_0 \cong 700\text{kHz}$$

写真 1 (直列共振-1)



$$L \cong 0.2\mu\text{H} \quad C \cong 0.26\mu\text{F} \quad f_0 \cong 700\text{kHz}$$

写真 2 (直列共振-2)

次ページ以降に、オシロスコープで観測された共振特性を示します。実験では掃引特性測定と正弦波応答測定を行います。いずれの場合も入力信号電圧の設定は 1V_{pp} です。

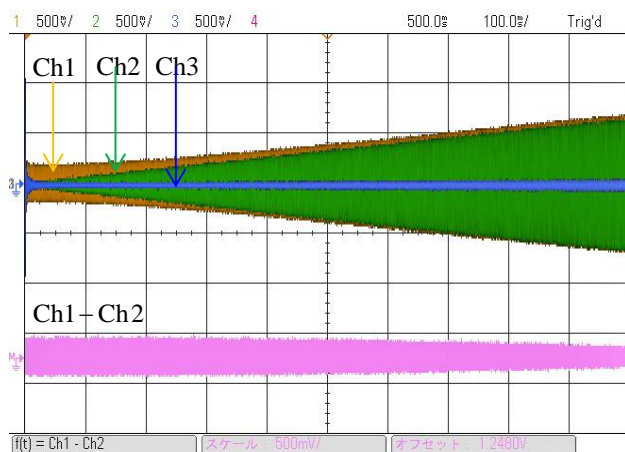
・掃引特性

直列共振回路の実験では上記の写真 1 および写真 2 のようにプローブを装着し、まず 100Hz から 30MHz までの広帯域での掃引実験を行います。

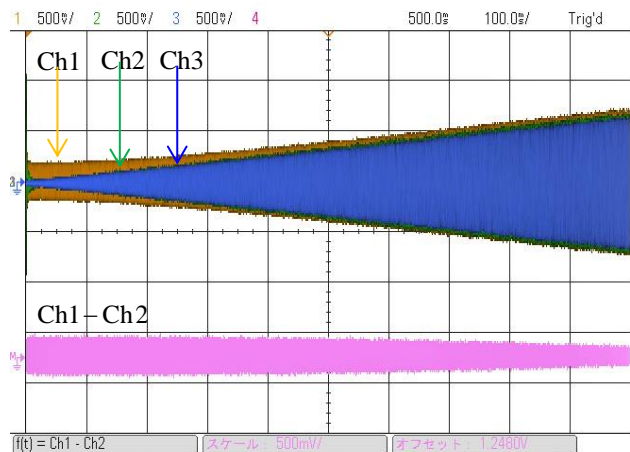
直列共振-1 では、グラウンド側にキャパシタがあるので高周波ではインピーダンスが低くなるため、Ch3 の電圧は高周波では低い値(理想的にはゼロ V)になっています。(次ページの図参照)

直列共振-2 では、グラウンド側にインダクタがあるので高周波ではインピーダンスが高くなるため、Ch3 の電圧は高周波では徐々に高い値になっています。(次ページの図参照)

このように、「直列共振-1」と「直列共振-2」では Ch3 の掃引特性が異なりますが、Ch1 と Ch2 の掃引特性は同じになります。共振特性をわかりやすく表示するために Ch3 を表示せず Ch1 と Ch2 をやや狭い帯域 100Hz～10MHz、と 100Hz～1MHz の間で掃引したグラフを表示しました(このグラフは「直列共振-1」と「直列共振-2」で同じです)。

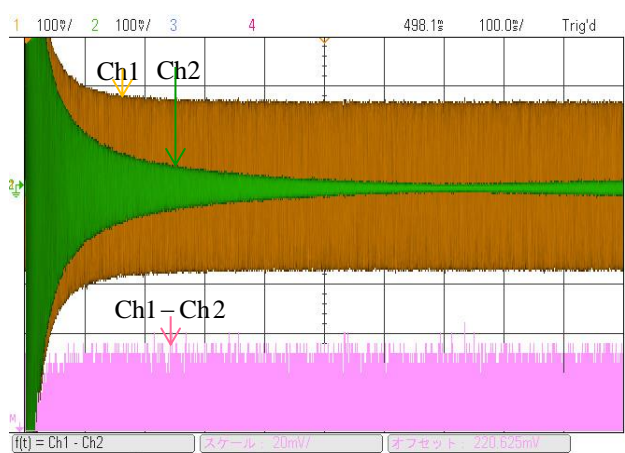


(a) 直列共振-1

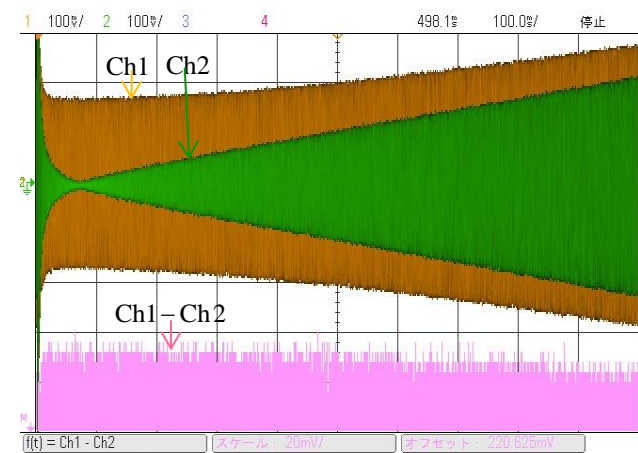


(b) 直列共振-2

掃引波形 (Start:100Hz, Stop:30MHz) (H : 100.0ms/)



(c) 掃引波形 (Start:100Hz, Stop:1MHz)

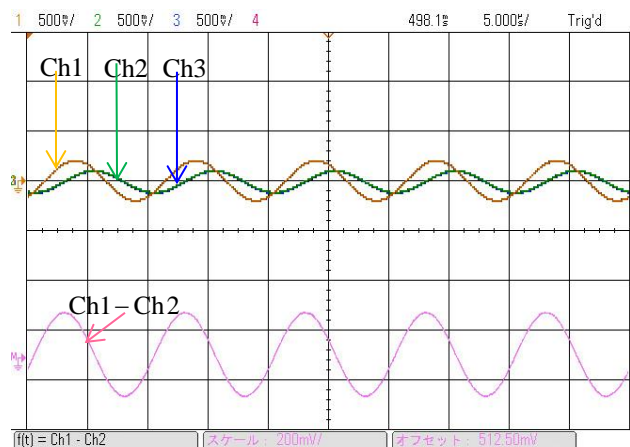
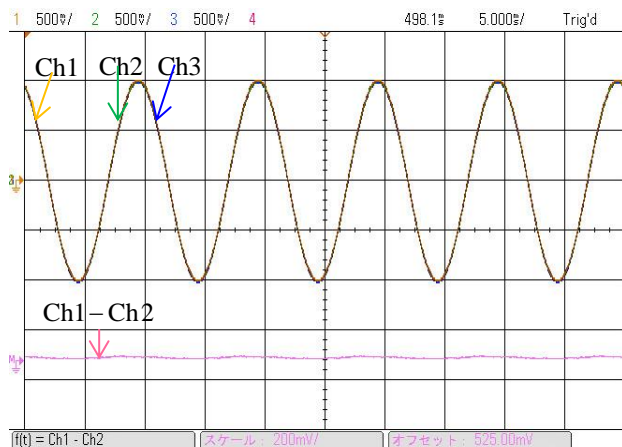


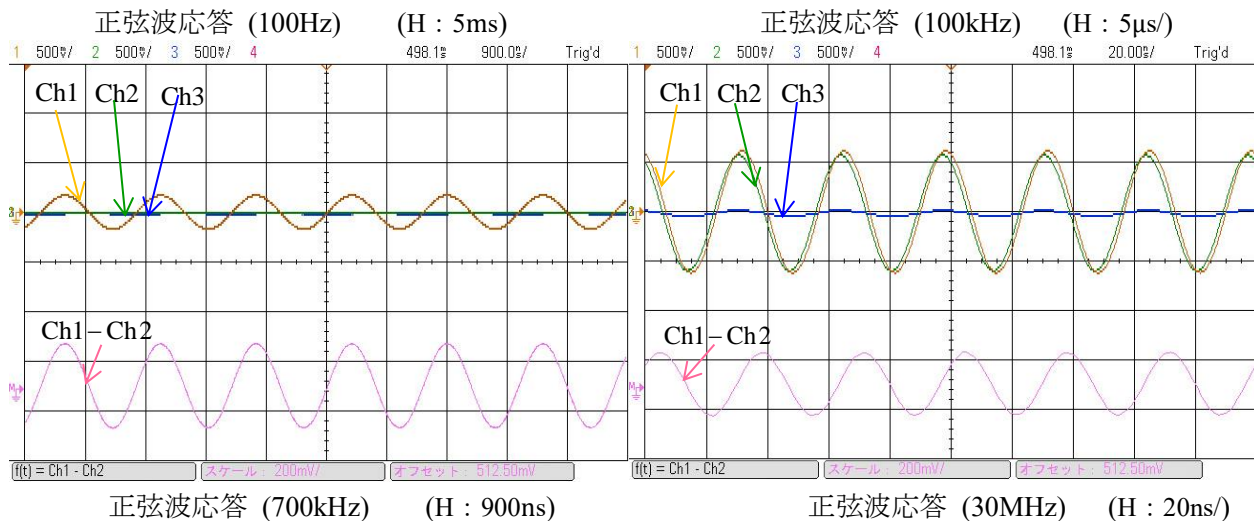
(d) 掃引波形 (Start:100Hz, Stop:10MHz)

直列共振特性

・正弦波特性

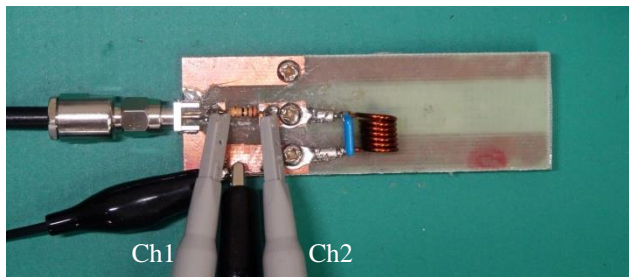
掃引波形から共振周波数を正確に読み取ることはできませんが上図(c)や(d)から約 700kHz 近辺で共振しているものと判定できます。直列共振-1 において単一正弦波の周波数を変えて Ch2 が最小となる周波数 (直列共振点) を探索します。ここでは、100Hz、100kHz、700kHz、30MHz の 4 点の波形を示します。Ch2 の電圧の振幅は約 700kHz で最小となることが分かります。





直列共振-2 の正弦波応答については Ch3 を除く Ch1 と Ch2 の特性は同じなので、掲載を省略します。

(2) 並列共振



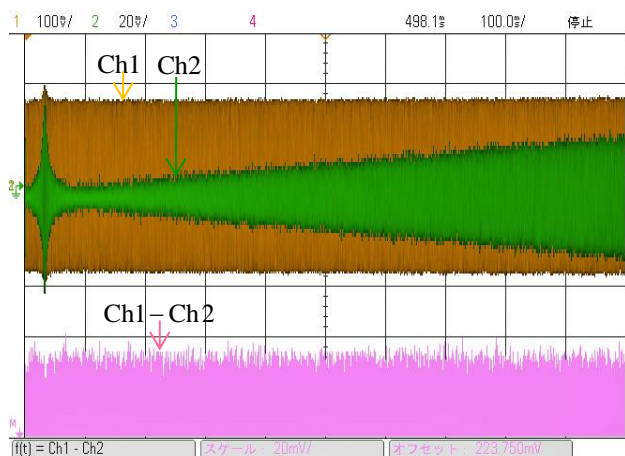
$L \cong 0.2 \mu\text{H}$ $C \cong 1.5 \mu\text{F}$ $f_0 \cong 315\text{kHz}$
写真 3

・掃引特性

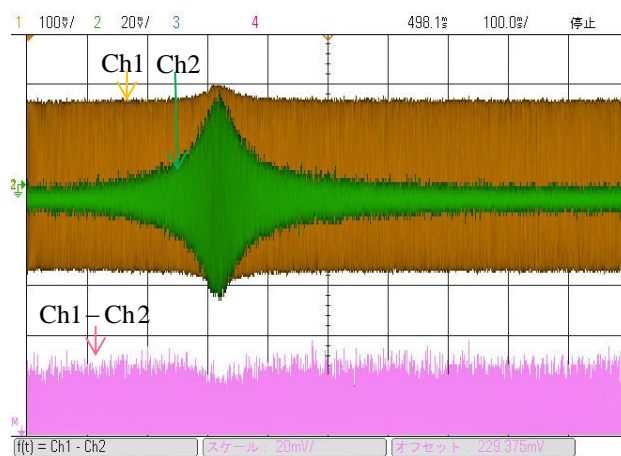
並列共振回路の実験では上記の写真 3 のようにプローブを装着し、まず 100Hz から 10MHz までの帯域で掃引実験を行います。(次ページの図(a)参照)

300MHz 近辺にピークが観測されます(Ch2 の垂直スケールは 20mV/であることを注意してください)

掃引幅を 100Hz から 1MHz までに変更した次ページの図(b)では Ch2 のピークが分かりやすくなり、共振周波数は 300kHz よりやや高い周波数であることが分かります。



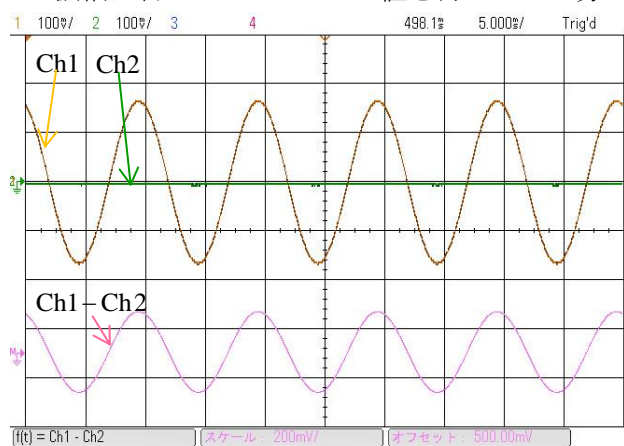
(a) 掃引波形 (Start:100Hz, Stop:10MHz)



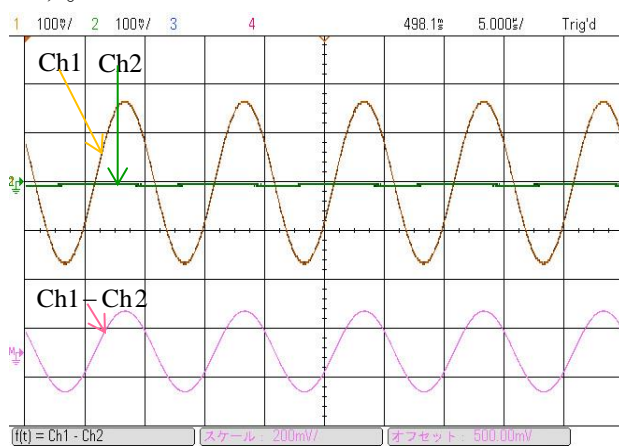
(b) 掃引波形 (Start:100Hz, Stop:1MHz)

・正弦波特性

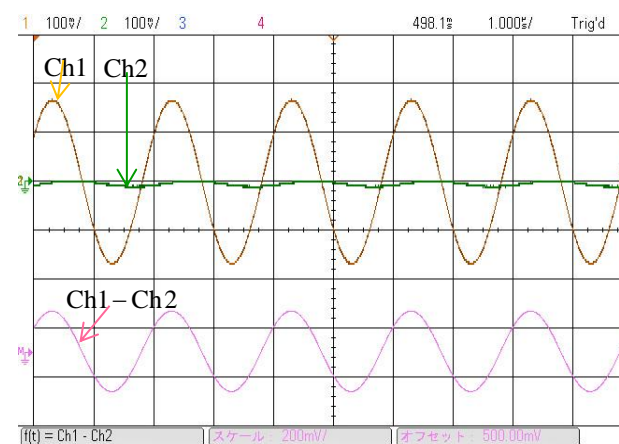
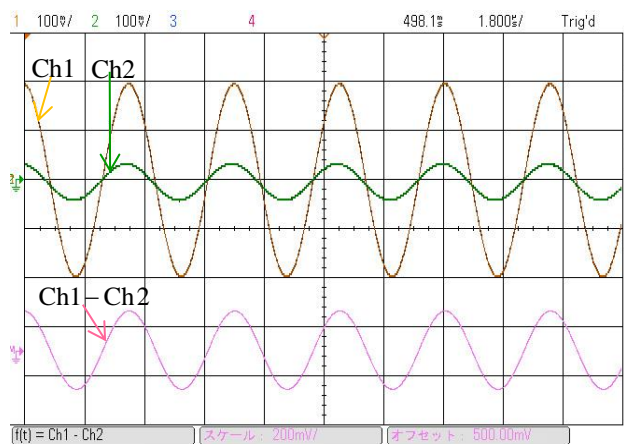
掃引波形から共振周波数を正確に読み取ることはできませんが上図(a)や(b)から約 300kHz 近辺で共振しているものと判定できます。並列共振回路で単一正弦波の周波数を変えて Ch2 が最大となる周波数(並列共振点)を探索します。ここでは、100Hz、100kHz、315kHz、500kHz の 4 点の波形を示します。Ch2 の電圧の振幅は約 315kHz でピーク値を持つことが分かります。



正弦波応答 (100Hz) (H : 5.000ms)



正弦波応答 (100kHz) (H : 5.000μs)



正弦波応答 (315kHz) (H : 1.800μs)

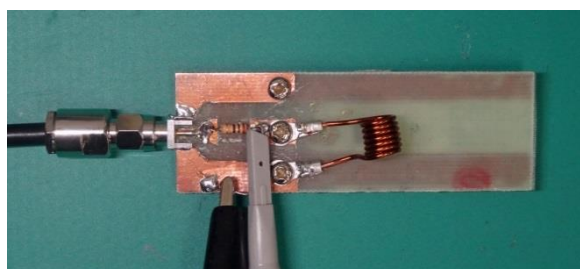
正弦波応答 (500kHz) (H : 1.000μs)

掃引波形から共振周波数を正確に読み取ることはできませんが、概略の値が分かった後で正弦波応答を観測しながらピークになる周波数を探索するとほぼ正確な共振周波数を測定することができます。

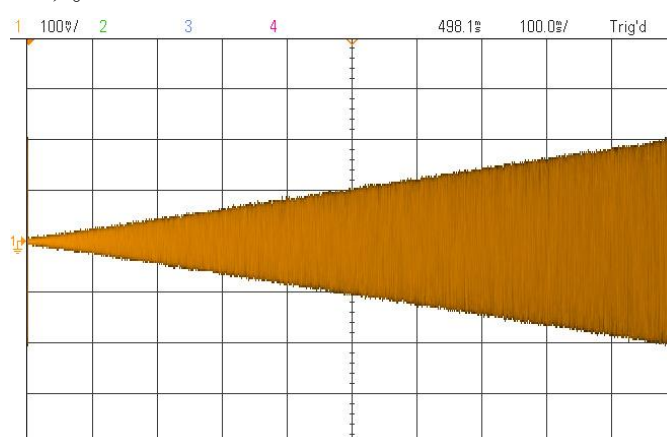
[参考]インダクタの値について

これまでの実験で用いた素子の値は Agilent 社製の Handheld LCR Meter U1732C (測定周波数 1kHz)で測定したものです。共振回路の実験では先に示したような共振特性を確認することが出来ましたが、U1732C で測定したインダクタとキャパシタの値を用いて共振周波数を計算すると、実験値より低くなりました。 C は市販品のキャパシタンスで公称値が表記しており、U1732C でもほぼ同じ値を示しますので、インダクタ(手巻きで作製)の値を共振周波数の測定と同じ構成(波形発生器+オシロスコープ)で確認しました。

下記の写真のようにインダクタ単体を信号供給用治具に装着し、100Hz から 10MHz まで周波数を掃引してインダクタの端子間電圧を測定した結果が下記右側のグラフです。



インダクタンスの電圧測定回路



インダクタの掃引応答電圧(100Hz～10MHz)

インダクタ L のインピーダンスは $j\omega L$ ですから周波数とともに大きくなります。信号発生器の内部抵抗 50Ω を考慮すると写真の回路は抵抗 $R = 60\Omega$ とインピーダンス $j\omega L$ の直列接続で表されるので、インダクタンス両端の電圧 V_L は次のようになります。

$$V_L = j\omega L / (R + j\omega L)$$

信号発生器の出力を V_g とすると、 V_L の振幅は $|V_L| = V_g / \sqrt{1 + (R/\omega L)^2}$ と表せます。この式から L は次のように求められます。

$$L = R / \omega \sqrt{\left(\frac{V_g}{V_L}\right)^2 + 1}$$

掃引応答電圧から 10MHz における振幅値を読み取ると約 400mV_{pp} になっています。そこで、上記の式に $R = 60\Omega$ 、 $\omega = 2\pi \times 10^7$ 、 $V_g = 2\text{V}_{pp}$ 、 $|V_L| = 400\text{mV}_{pp}$ を代入して L を求めると約 $0.2\mu\text{H}$ となります。

この値とキャパシタの公称値から共振周波数を求めると、実測結果と一致します。

そこで、共振回路の実験で使用したインダクタの値には、上記の方法で測定したものをしました。

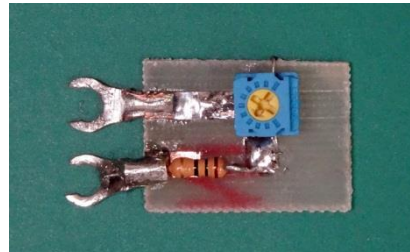
5. 補遺

5.1 消費電力最大の法則の検証

・使用部品: 半固定抵抗とドライバ



半固定抵抗とドライバ



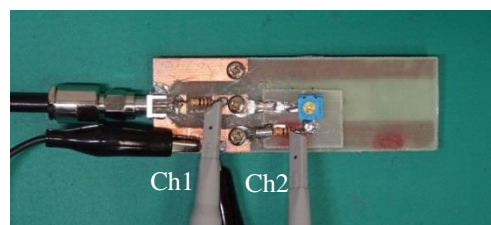
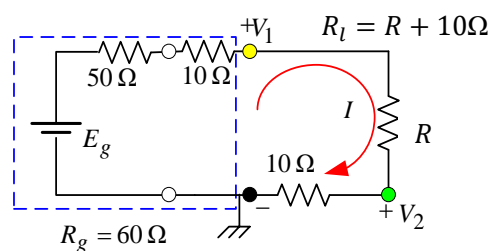
半固定抵抗+10Ω の拡大写真

負荷抵抗を変化させた場合の、回路状態を観測するため、半固定抵抗を用います。半固定抵抗の抵抗値を変えるために竹製のドライバを用意しました。抵抗値は $0\Omega \sim 300\Omega$ (公称) の間で可変ですが、目盛が細かいため目盛で抵抗値を正確に判定することはかなり困難ですが、後述するようにオシロスコープの表示電圧を見ながら調整してください。

・実験回路

「電源の内部抵抗(電源抵抗)と負荷抵抗が等しいとき、負荷抵抗の消費電力は最大になる」ことを消費電力最大の法則といいます。(テキストの p.17 「1.5.5 直流電力」 参照)

この法則を検証する実験を行います。実験は左下に図示された回路を用いて行います。右下の写真は実際の実験回路構成を示しています。



消費電力最大の法則を検証する回路

この回路では、信号発生器とそれに接続した信号供給用治具の全体(図の点線で囲まれた部分)を信号供給源(電源電圧 E_g 、内部抵抗 60Ω)と考えます。図の $R_l = R + 10\Omega$ は信号供給源に対する負荷抵抗です。 R は半固定抵抗を示します。

負荷で消費される電力 P_l は図の電圧 V_1 と電流 I の積で与えられます。電流 I は、半固定抵抗器に直列接続された 10Ω の抵抗の電圧 V_2 を測定し、 $I = V_2/10$ の関係から求めることができます。

したがって、消費電力 $P_l = V_1 \times I = V_1 \times V_2/10$ で与えられます。

・波形発生器の設定

[Waveforms]ボタンを押して表示されるソフトキーのWaveformメニューにある[More 1 or 2]を押して[DC]を選びます。ディスプレイに[Offset]と表示されるので、テンキーで1Vに設定します。
(実験回路図の電源電圧 E_g は2Vに設定されたこととなりますので注意してください)

・オシロスコープの設定

Ch1 と Ch2 のプローブを上記の写真のように装着します。

水平スケールは(直流なので任意に選んで問題はありませんが、ここでは)1.000ms/に設定します。

垂直スケールは最大になる状態をできるだけ正確に測定するために、半固定抵抗 R の値に応じて適切に設定する必要があります。オフセットもずらし、できるだけ感度の高い状態に設定する必要があります。下記に示すグラフに従って設定してください。

・最大消費電力を与える抵抗値(R)の測定

Ch1 で負荷電圧 V_1 、Ch2 で電流測定用抵抗(10Ω)の電圧 V_2 を測定します。

次に、オシロスコープのフロントパネル右側の追加キー群の中の[Math]演算キーを押して、[演算ソフトキー]から[乗算]を選びます。

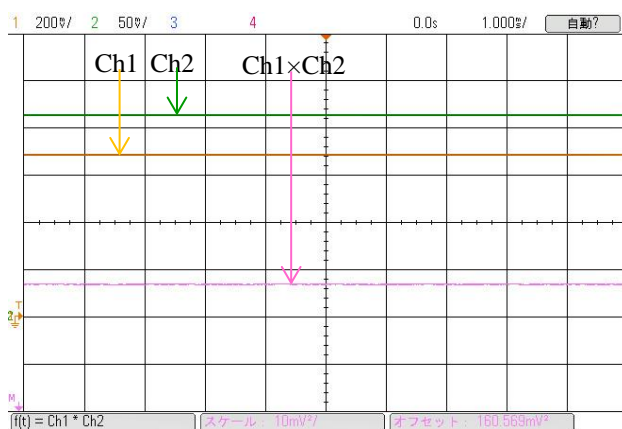
表示された演算結果は、 $V_1 \times V_2$ を表しています。これを 10Ω で割った値が消費電力です。

竹製のドライバで半固定抵抗の軸を時計回りに回すと抵抗値が大きくなり(最大 300Ω)、反時計回りに回すと小さくなります(最小 0Ω)。

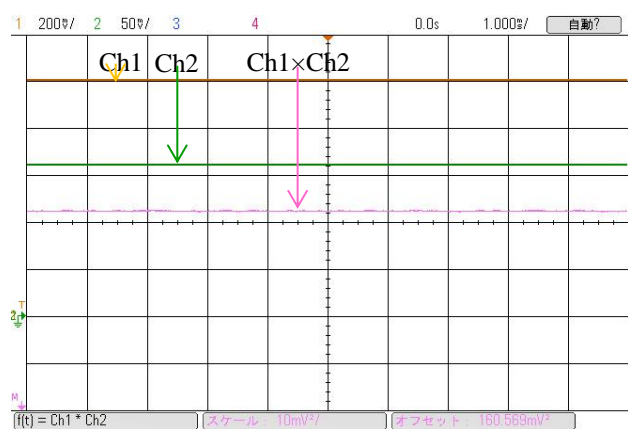
[Math]演算の薄紫色で表示された値が最大になるところを探してください。その時の負荷電圧を測定すると(電源電圧 E_g の1/2の)1V になっているはずです。

「消費電力最大の法則」によれば、信号供給源(電源電圧 E_g 、内部抵抗 60Ω)に接続された負荷抵抗 R_L で消費される電力が最大になる条件は $R_L = R + 10\Omega = 60\Omega$ ですから、 $R = 50\Omega$ であることが分かります。

測定結果 ($R = 20\Omega, 50\Omega, 80\Omega$ の場合について測定)



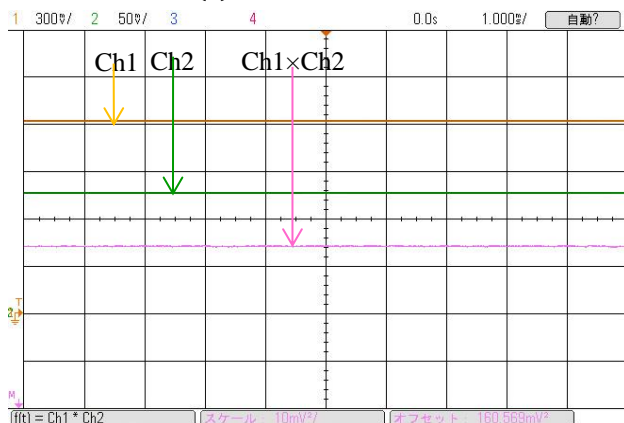
$$\text{Ch1} \times \text{Ch2} = V_1 \times V_2 \cong 27\text{mV}^2$$



$$\text{Ch1} \times \text{Ch2} = V_1 \times V_2 \cong 43\text{mV}^2$$

$$\text{Ch1} = V_1 \cong 680\text{mV} \quad \text{Ch2} = V_2 \cong 230\text{mV}$$

(a) $R = 20\Omega$ の場合



$$\text{Ch1} \times \text{Ch2} = V_1 \times V_2 \cong 34\text{mV}^2$$

$$\text{Ch1} = V_1 \cong 1.23\text{V} \quad \text{Ch2} = V_2 \cong 130\text{mV}$$

(c) $R = 80\Omega$ の場合

$$\text{Ch1} = V_1 \cong 1\text{V} \quad \text{Ch2} = V_2 \cong 165\text{mV}$$

(b) $R = 50\Omega$ の場合(消費電力最大)

オフセット :

Ch1 と Ch2 については下から 2 番目の水平線に、
Ch1 × Ch2 については一番下の水平線に合わせて
あります。

垂直スケール :

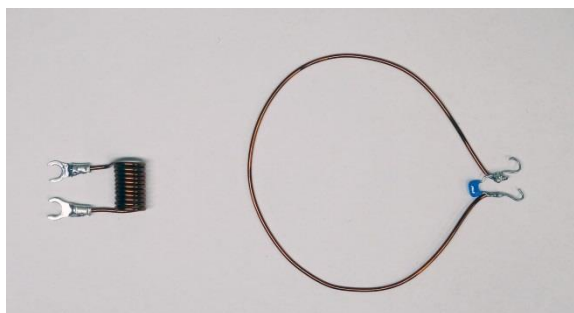
Ch1 と Ch2 については、3 つのグラフとも Ch2 が
50mV/、Ch1 × Ch2 が 10mV²/と同じです。

Ch1 は $R = 20\Omega$ と 50Ω の場合に同じ 200mV/ ですが、
 $R = 80\Omega$ の場合は 300mV/ になっています。

5.2 無線電力伝送の模擬実験

・使用部品: インダクタと「ループ系回路」

電流を流して磁界を発生させるためのインダクタと、発生した磁界と結合して電力を誘導するための「ループ系回路」を用意しました。



インダクタと「ループ系回路」

インダクタ:

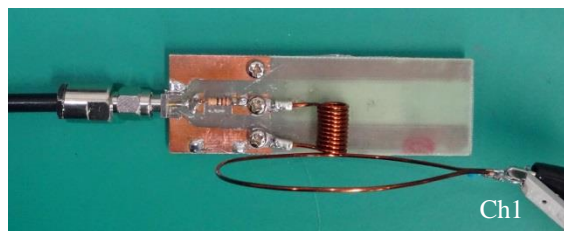
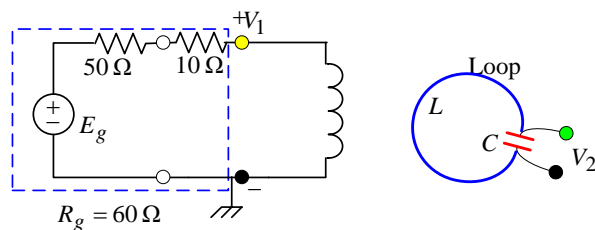
課題 3 で用いたコイル#1(茶色)を使用します。

ループ系回路:

1ターンのコイルとキャパシタを並列接続し
た回路です。

・実験回路

無線電力伝送はスマートフォンや電気自動車などへの非接触給電技術として知られています。その動作原理の基本は電磁誘導現象です。ここでは、左下に図示された回路を用いて無線電力伝送を模擬する実験を行います。右下の写真は実際の実験回路構成を示しています。



無線電力伝送模擬実験回路

この回路においても先の実験と同様に、信号発生器とそれに接続した信号供給用治具の全体(図の点線で囲まれた部分)を信号供給源(電源電圧 E_g 、内部抵抗 60Ω)と考えます。信号供給源にインダクタ(コイル)を接続します。インダクタに交流が流れると磁界が発生し、外部に漏れ広がります。このインダクタに、上記の図のような1ターンのループ(インダクタンス L)とキャパシタ C が並列接続された(ループ系回路)を写真に示すように近づけるとキャパシタの両端に電圧 V_2 が観測されます。

電圧 V_2 の大きさは L と C による共振周波数 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ で最大になります。

また、電圧 V_2 の大きさは「ループ系回路」が信号供給源に接続されたインダクタに近い(結合係数大きい)ほど大きく、遠く離れる(結合係数小さい)ほど小さくなります。

まず、信号発生器の周波数掃引機能によって共振周波数 f_0 を測定します。次に共振周波数 f_0 における電圧 V_2 を「ループ系回路」と信号供給源に接続されたインダクタとの距離を変えながら観測します。

・周波数掃引機能による共振周波数 f_0 の測定

信号発生器の設定

[Sweep]ボタンを押して Sweep を On にして、掃引タイプを Linear に設定します。

[Sweep Time]を 1sec(100msec/)、[Start Freq]を 100Hz、[Stop Freq]を 30MHz に設定して共振周波数 f_0 の概略を測定します。次に[Sweep Time]を 100Hz、[Stop Freq]を 3MHz に設定して共振周波数 f_0 の値を読み取ります。

注：実験例では約 1.28MHz ですが、実験使用によって多少異なりますので、各自確認してください。

[Amplitude]は 1Vpp に設定します。

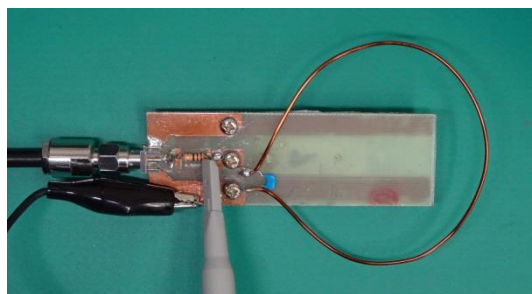
[Trigger]を押して表示される Trigger/Sync の最初の Source/Immed ソフトキーを押すと、トリガ・メニューが表示されますので、最初の Immed を選択すると連続的に波形を出力します。

オシロスコープの設定

垂直軸：Ch1 のみ使用します。

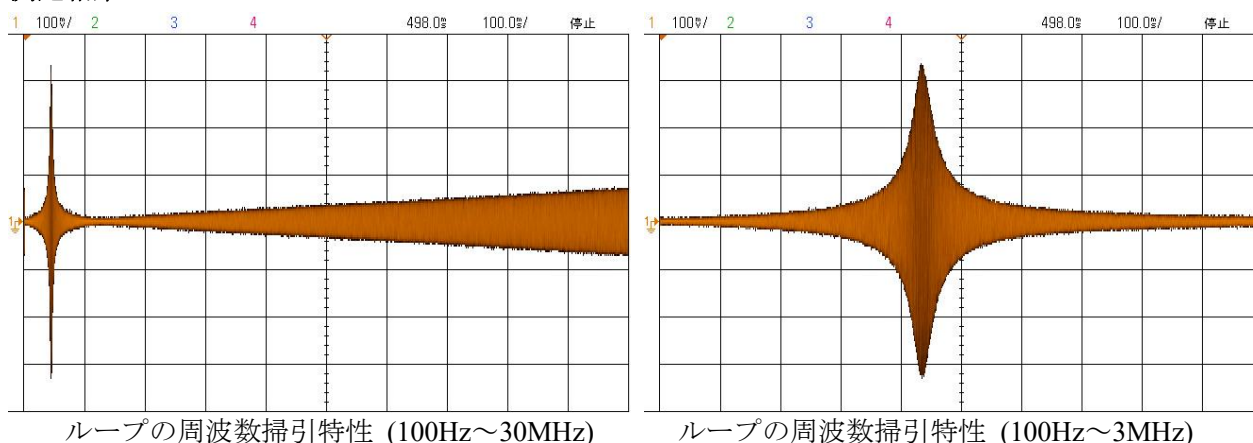
水平軸：100ms/に設定します。[Sweep Time]を 1sec に設定したので、オシロスコープの横軸を左端から右端まで掃引するのに 1sec かかることになります。

実験回路



ループ系回路を信号供給用治具に取り付けて、周波数掃引特性を測定します。

測定結果



測定結果から、共振周波数は約 1.3MHz 近辺にあることが分かります。

信号発生器の[Sweep]を OFF して、[Sine]に変更し、単一周波数で出力が最大になる周波数を求めて共振周波数が 1.28MHz であることを確認することができます。

・共振周波数 f_0 における電圧 V_2

「ループ系回路」と信号供給源に接続されたインダクタとの距離(結合の強さ)を変えて電圧レベルの変化を観測します。

信号発生器の設定

[Waveforms]ボタンを押して表示されるソフトキーのWaveformメニューから[Sine]を選びます。

[Parameters]ボタンを押して[Frequency]メニューを選び、テンキーで周波数を先の実験で求めた周波数(実験例では1.28MHz)に設定した後、

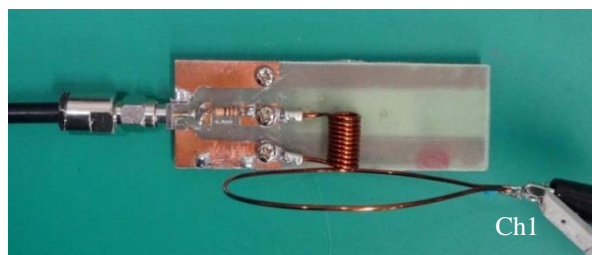
[Amplitude]メニューを選び、テンキーで電圧を10V_{pp}(信号発生器の最大出力電圧)に設定します。

オシロスコープの設定

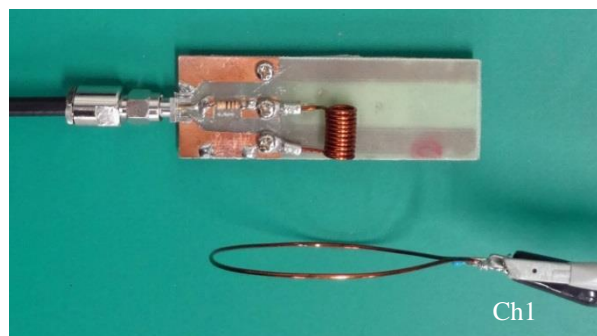
Ch1 のプローブを写真のようにループ系回路の端子に装着します。

垂直スケールと水平スケールは実験結果のグラフを参照してください。

実験回路



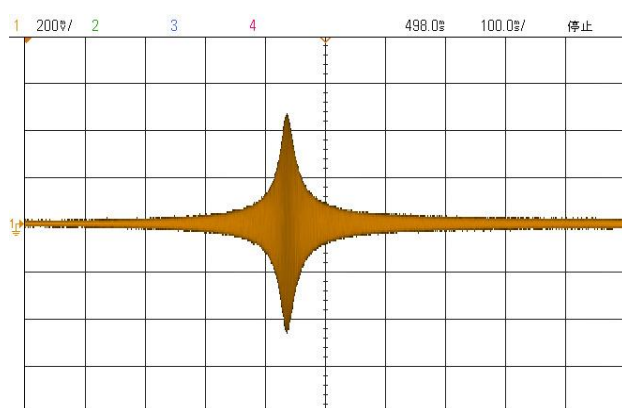
電圧 V_2 の測定 (最接近状態)



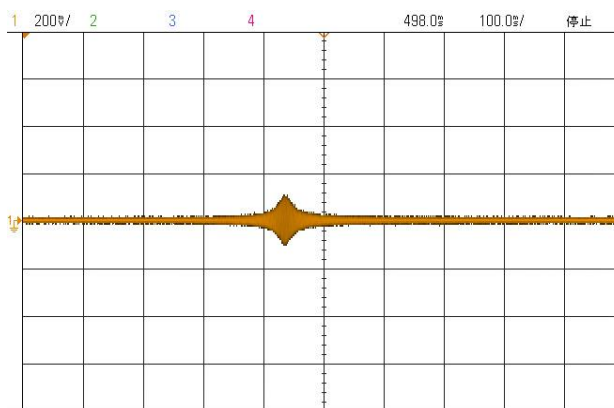
電圧 V_2 の測定 (距離 20mm)

測定結果

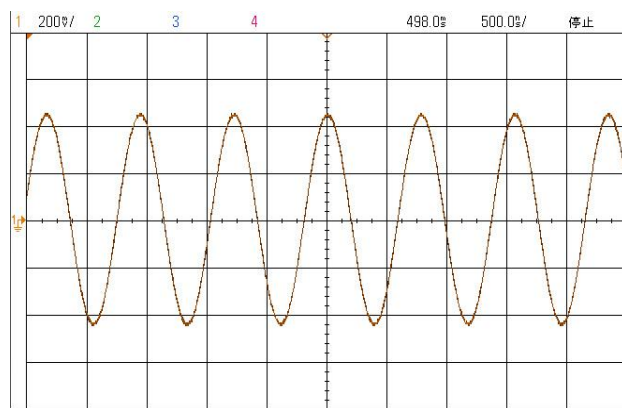
周波数掃引特性:



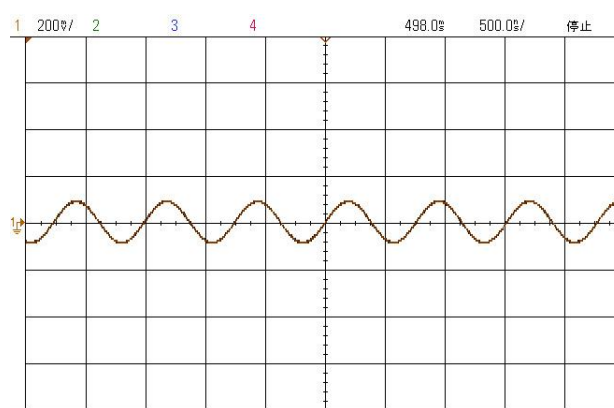
出力電圧 V_2 (100Hz-3MHz)-最接近状態



出力電圧 V_2 (100Hz-3MHz)-距離 20mm



電圧 V_2 (1.28MHz)-最接近状態



電圧 V_2 (1.28MHz)-距離 20mm

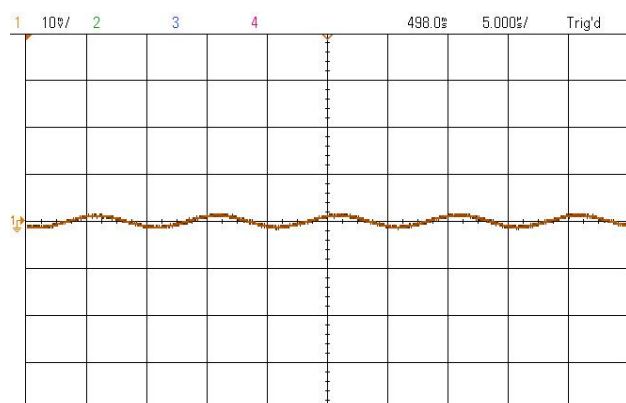
掃引特性と単一周波数特性で共振点におけるピーク値がほぼ等しいことが分かります。

・共振周波数 f_0 から離れた周波数における電圧 V_2

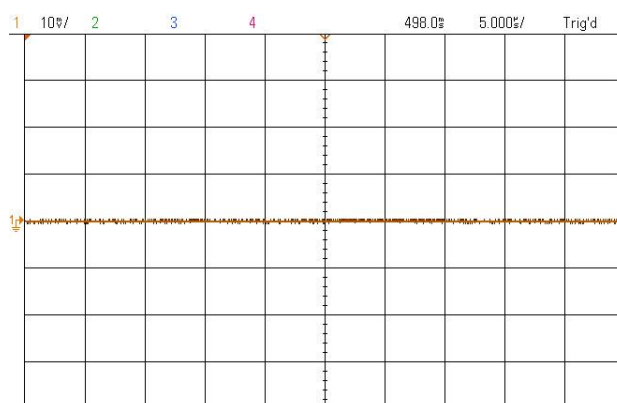
V_2 は共振周波数 f_0 (1.28MHz)で大きなピークを示していますが、 f_0 から離れた周波数においても電圧レベルが観測されます。これは信号源側のインダクタとループ系回路の L の間の相互誘導によるものです。ここでは、

100kHz における最接近状態と無結合状態(ループ系回路を信号源インダクタから遠く離れた状態)の電圧 V_2 を測定した結果を示します。

上図の掃引特性からも 100kHz で少しですが電圧レベルを観測できます。単一周波数で見ると、次ページの左図のように約 4mV_{pp} の電圧が観測されます。ループ系回路を遠ざけると右図のように電圧は観測されなくなりますので、この約 4mV_{pp} の電圧は信号源側のインダクタとループ系回路の L の間の相互誘導によるものであることが分かります。



出力電圧 V_2 (100kHz)-最接近状態



出力電圧 V_2 (100kHz)-無結合状態

以上