

# 設計ガイドラインセミナー入門編

## 第2部 伝送線路編

### 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

## まえがき

このテキストは、電気通信大学産学官連携センターのギガビット研究会が2014年から2019年に開催していた「設計ガイドラインセミナー入門編」用に作成したものである。

ギガビット研究会は、2011年度から2021年度までの10年間、企業と大学を結ぶためのコンソーシアムとして、社会人技術者の再教育や啓蒙活動、大学での成果を企業へ展開する活動、そして共同研究やコンサルテーションを柱とするものとして設立された。特に、技術者の再教育に関しては、日本企業の技術力向上に貢献することを目指し、ほとんどのセミナー業界で行われるようなEMC問題の対処療法的な事例紹介を主内容とするものとは異質の、理論に裏打ちされた考え方、解決手段を学習してもらうことが主眼の大学ならではの特色を打ち出して活動してきた。

高専や大学においては、電気回路と電磁気学とは全く異なる授業科目として履修し、その間の関係を明らかにすることはほとんどなく学習している。それらの上級科目として高周波（マイクロ波）回路や伝送回路などや、電磁波工学やアンテナ工学などの授業科目がある。これら上級科目は必ずしも開講されていない場合が最近では多くある。この結果、特定の研究室に所属して始めて学習するという現実がある。EMC（電磁両立性）の問題は、電気回路（高周波回路）と電磁気学（電磁波論）と融合領域の問題である。現在の電気電子機器やデジタル技術を応用する各種機器製品は、その性質上不要な電磁波（妨害波）を放出しており、通信に妨害や干渉を及ぼす恐れがある。この危惧に対処するためにEMC規格がある。電気電子機器の設計においては、電気機器の本来の仕様を満足しながら、この規制値を満足するという両立性が求められることになる。設計ガイドラインとは、電子機器の設計において基本となる配線を含む回路素子の働きや現象、妨害波発生メカニズムを理解し、設計に生かすことの指針を示すことである。

2020年度からは新型コロナウイルスによるパンデミックため対面による会合が開催されなかった。このため実験を伴う設計ガイドライン入門編や中級編は開催されずに研究会が終了した。これに伴い資料テキストを公開することになった。

このテキスト執筆と講義は上芳夫が主に担当し、実験においては中村隆（岐阜大学名誉教授/電通大客員教授）と萱野良樹が担当し、福澤恵司と上がサポートした。また、入門編の実験手引書は（故）橋本慶隆が担当した。

電気通信大学産学官連携センター ギガビット研究会事務局

本間高弘 知的財産部門長・教授

萱野良樹 情報・ネットワーク工学専攻 准教授

上 芳夫 特任教授・代表

堀 建二 客員教授

（故）橋本慶隆 客員教授（2021年8月20日逝去）

福澤恵司 客員教授

雨宮不二雄（2014年度から）客員教授

高坂直子 非常勤事務員

注：このテキストに関する問い合わせにお答えすることはできませんので、ご了承ください。

# 目次

1. 実験の準備 .....	1
1.1 実験に使用する測定器 .....	1
1.2 実験に使用する備品 .....	1
2. 伝送線路の基礎 .....	6
(1) 課題 1(a) 終端：開放 .....	7
(2) 課題 1(b) 終端：抵抗負荷 ( $R = 10\Omega$ ) .....	9
(2) 課題 1(c) 終端：キャパシタ負荷 ( $C = 457\text{pF}$ ) .....	10
(2) 課題 1(d) 終端：インダクタ負荷 ( $L = 0.63\mu\text{H}$ ) .....	12
2.1 伝送線路は LC 素子の集合 .....	14
2.1.1 バランの特性 .....	14
2.1.2 平行 2 本線(3m)を用いた平衡伝送線路の実験 .....	17
2.1.3 LC 素子の多段接続回路による擬似伝送線路の実験 .....	19
2.2 伝送線路の電磁界と線路電圧電流 (課題 2) 【参考実験】 .....	22
2.3～2.7 関連する実験はありません	
2.8 入射波と反射波と透過波 .....	25
2.8.1 課題 3-1 平行 2 本線路の周波数応答 .....	25
2.8.2 課題 3-2 同軸線路の周波数応答 .....	28
2.9 時間領域での現象 .....	34
2.9.1 平行 2 本線路のパルス応答 .....	35
2.9.2 同軸線路のパルス応答 .....	37
2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか .....	41
2.10.1 平行 2 本線路を流れる電流の検証例 (その 1)(その 2) .....	41
2.10.2 平行 2 本線路を流れる電流の検証例 (その 3)(その 4) .....	44
2.10.3 グラウンドのとり方に関する追加実験 【参考データ】 .....	46
課題 4 思考実験	
3. クロストーク現象の基礎実験 .....	49
3.1 低周波での磁界結合 .....	49
3.2 低周波での電界結合 .....	50
3.3 高周波でのクロストーク現象 .....	51

電気通信大学 ギガビット研究会  
第2版 2017年10月5日

## 設計ガイドラインセミナー入門編 第2部 伝送線路編 実験手引書

### 1. 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。

#### 1.1 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 P.12 を参照してください)

【注意 1】 出力電圧は、 $50\Omega$  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  $50\Omega$  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。(別紙マニュアルの p.14 を参照して下さい)

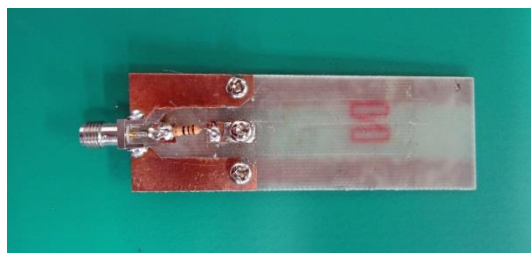
【注意 3】 [Run/Stop]ボタンの下にある[Default Setup]ボタンを押すと初期(工場出荷)状態に戻ります。オシロスコープが不安定になった場合や、所期の動作をしなくなった場合には初期(工場出荷)状態に戻してみてください。

#### 1.2 実験に使用する備品

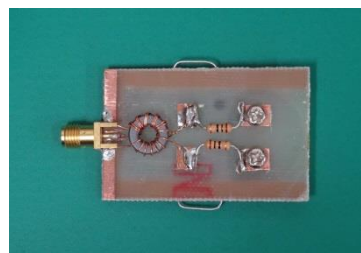
(1) 実験器材(治具・ケーブル等)：

各課題で共通に使用する実験器材は以下の通りです。共通品以外は、各課題の解説の中で示します。

- ・ 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)
- ・ 信号供給用治具



信号供給用治具 A (バランなし)



信号供給用治具 B (バラン付)

電流測定等のため、あらかじめ  $10\Omega$  の抵抗が信号入力端に直列に接続されています。



## ・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。

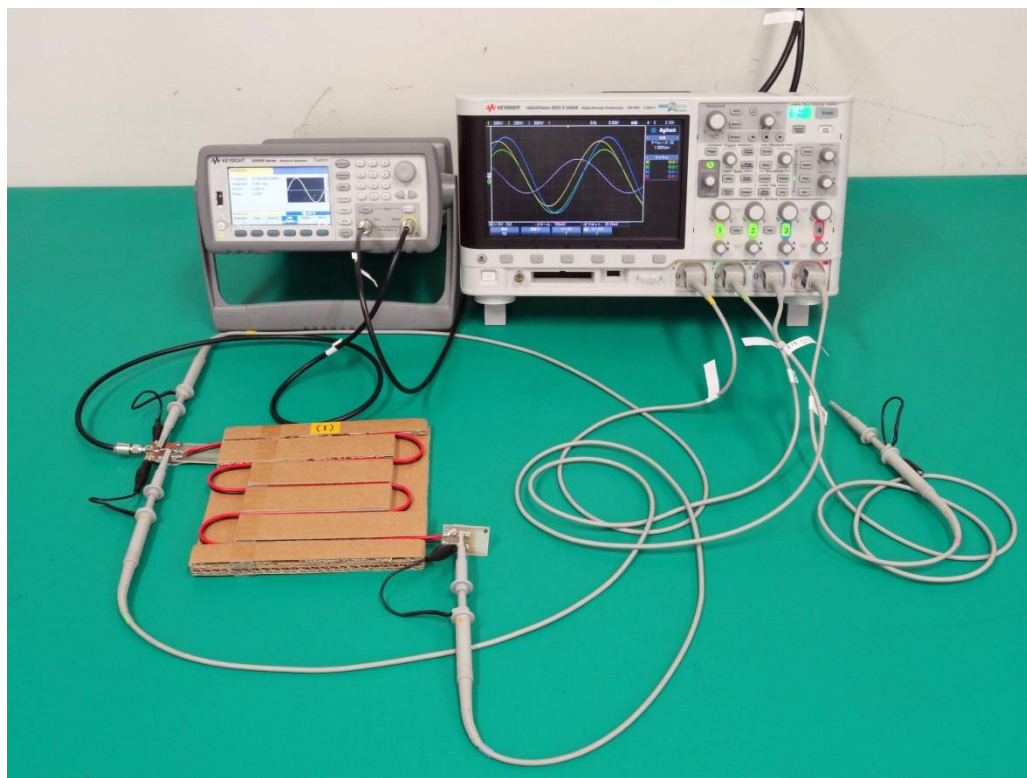
信号供給用治具には A(バランなし)と B(バラン付)の 2 種類があります。信号供給用治具 B(バラン付)は 2.1、2.2 などで使用します。下図は信号供給用治具 A(バランなし)を用いた課題 1(a)の接続状態を示しています。

信号供給用治具 A を用いる場合、実験試料を信号供給用治具の SMA コネクタに直列接続されている電流測定用の抵抗( $10\Omega$ )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。

信号供給用治具 B を用いる場合、実験試料をバランの 2 次巻線のプラス側とマイナス側に直列接続されている電流測定用の抵抗(各  $10\Omega$ )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。

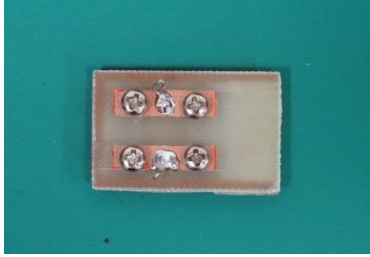


実験の基本構成

信号供給用治具(A)の接続状態は課題 1(a)の場合と同様

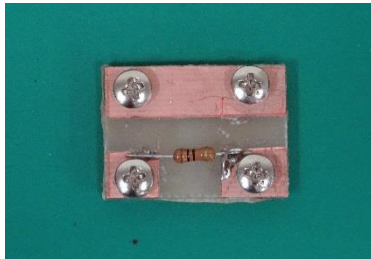
## ・終端接続用治具

## ・終端短絡用部品

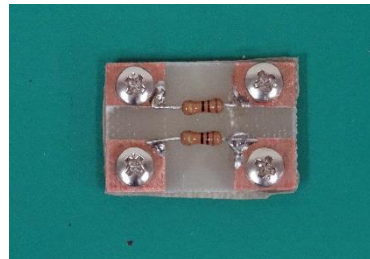


#### ・中間接続用治具

「2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか」の実験で、次の伝送線路用ケーブルの項で述べる長さ 1m の平行 2 本線の(1)と(2)を接続するために使用します。



中間接続治具 A



中間接続治具 B

#### ・ドライバ



伝送線路や回路部品を治具にネジ留めするために使用します。

#### ・伝送線路用ケーブル

平行 2 本線：

A. 長さ 1m (3 種類：取り扱いの便宜上、次ページの写真のように台紙上に固定してあります)

(1) PVC 被覆( $\epsilon = 3.3 \sim 4.5$ ) 外径 2.6mm $\phi$  内径 1.2mm $\phi$  芯線 0.2mm $\times$ 24 本

特性インピーダンス  $Z_0 \cong 125\Omega$  長さ 1m 被覆の色：赤・黒

(2) 同上 テキスト「2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか」の実験で使用します。

(3) (1)および(2)と同特性で色違い(赤・黒および白・青)の平行 2 本線 2 組

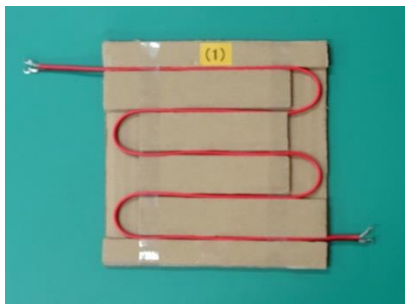
第 3 章(課題 5～6)のクロストークの実験で使用します。

B. 長さ 3m

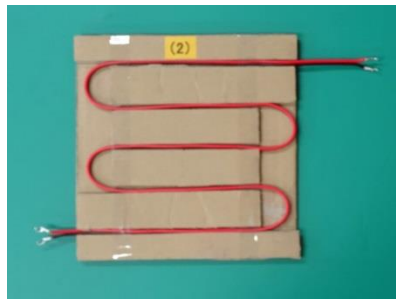
PVC 被覆( $\epsilon = 3.3 \sim 4.5$ ) 外径 1.8mm $\phi$  内径 0.8mm $\phi$  芯線 0.2mm $\times$ 12 本

特性インピーダンス  $Z_0 \cong 133\Omega$

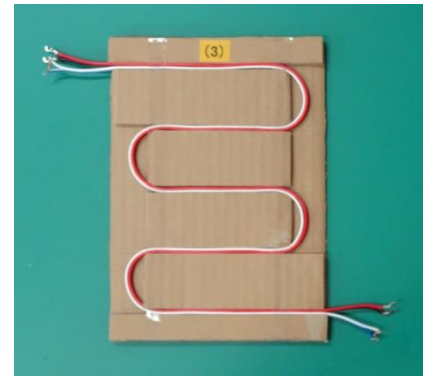
テキスト「2.1 伝送線路は LC 素子の集合」および「2.9 時間領域の現象」の実験で使用します。



(1)



(2)



(3)

長さ 1m の平行 2 本線 (台紙付き)

同軸ケーブル : (合計 2 本)

(1) 特性インピーダンス  $Z_0 = 50\Omega$  (古河電工 RG-58A/U) 長さ 1m (1 本)

(2) 特性インピーダンス  $Z_0 = 50\Omega$  (古河電工 RG-58A/U) 長さ 3m (1 本)

**【参考試料】** 試料を多数用意することが困難なものについては、講師用のみ準備し、講師が行う実験を観察していただきます。これらの実験で用いる試料を参考試料と呼ぶことにします。同軸ケーブルとしては、 $Z_0 = 50\Omega$  (KHD 3D-2V) 長さ 7.2m を 1 本用意しています。その他、「2.2 伝送線路の電磁界と線路電圧電流」で用いる磁界プローブと電界プローブも参考試料として用意します。

#### ・アルミ板とボール紙の箱

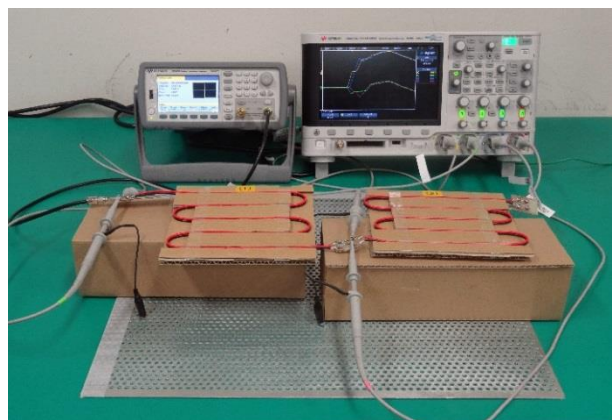
アルミ板は「2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか」の実験で、伝送線路系のグラウンドとして使用します。ボール紙の箱は、伝送線路とアルミ板の間隔をとるための台として使用する参考データ用の予備品です。



アルミ板



ボール紙の箱(台として使用) : 予備品



伝送線路とアルミ板の間隔をとった状態の 1 例

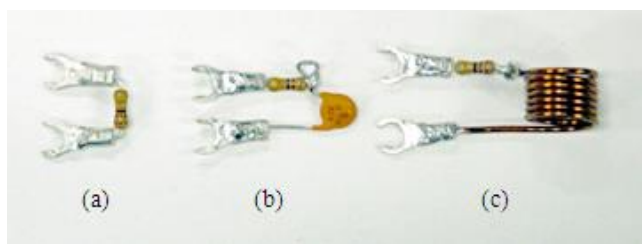


アルミ板にグラウンドをとる線材 : 予備品

#### (2) 実験試料 (回路部品等)

実験に使用する試料(終端用回路素子等)は全て準備してあります。

・課題 1 で使用する終端用回路素子

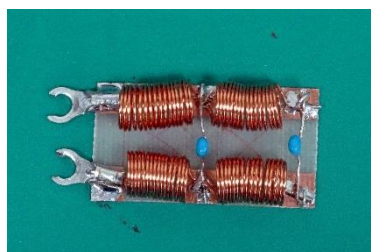


(a) 抵抗  $R = 10\Omega$

(b) 抵抗  $R = 10\Omega$  + キャパシタ  $C = 457\text{pF}$

(c) 抵抗  $R = 10\Omega$  + インダクタ  $L = 0.63\mu\text{H}$

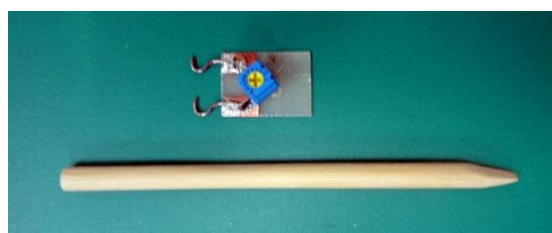
・「2.1 伝送線路は LC 素子の集合」で使用する LC 多段接続回路



$L = 1.1\mu\text{H}$ ,

$C = 56\text{pF}$

(3) 「2.9 時間領域での現象」で使用する半固定抵抗とドライバ



(4) 「3. クロストーク現象の基礎実験」で使用する  $50\Omega$  の終端抵抗



**【参考試料】**「2.2 伝送線路の電磁界と線路電圧電流」で使用する磁界プローブと電界プローブについては本文中で示します。

以上、本実験で用いる測定器と備品の概要を述べました。回路素子(R, L, C)の値が、本実験手引書の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、念の為、LCR メータを 1 台用意してあります。



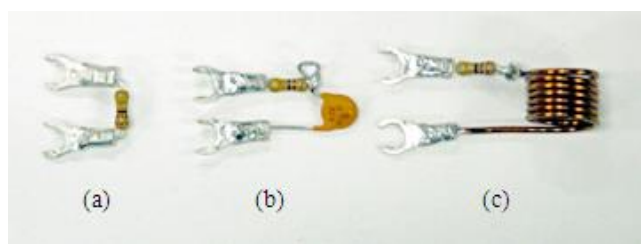
## 2. 伝送線路の基礎

### 課題 1

- 本実験では、信号供給用治具 A (バランなし)と終端接続用治具に長さ 1m の平行 2 本線-(1)を接続し、終端条件を変えた場合における平行 2 本線の入力電流 $i_i(t)$ と入力電圧 $v_i(t)$ および出力電流 $i_l(t)$ と出力電圧 $v_l(t)$ の周波数依存性を確認します。

#### ・実験試料

「終端接続用治具」に下記の部品を接続して実験します。



(a) 抵抗 $R = 10\Omega$

(b) 抵抗 $R = 10\Omega$  + キャパシタ $C = 457\text{pF}$

(c) 抵抗 $R = 10\Omega$  + インダクタ $L = 0.63\mu\text{H}$

#### ・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[Sine]を押して正弦波形を選びます。

[Parameter]ボタンを押して表示されるソフトキーのFrequencyを選び、数字キーで(あるいはノブを回して)周波数の値を設定します。周波数の単位を示すソフトキーから設定する単位を選びます。

出力レベルについては後述しますが、ソフトキーのAmplitudeを選び、1Vppに設定します。

#### ・オシロスコープの設定

Ch1~Ch4 の各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チャンネル感度を設定します。

水平スケールは選択した周波数に合わせて見やすい状態に設定します。

#### ・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 p.14 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

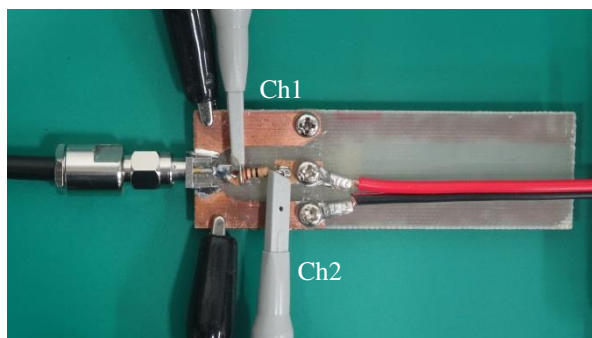
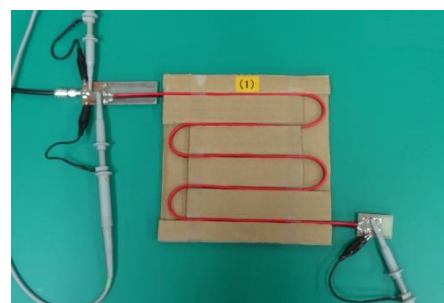
信号波形のノイズが気になる場合(特に差分信号を表示する場合にはオシロスコープの同相信号除去機能に限界があるため、ノイズが目立ちます)、周期信号であればアベレージング(平均化処理)によって、表示する信号のノイズを低減することができます。

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。

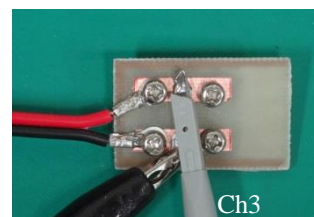
### (1) 課題 1(a) 終端：開放

測定回路のセットアップとオシロスコープへの接続状態を右の写真に、また入力部と出力部を拡大して下の写真に示します。  
課題 1(b)～4(c)では出力部の終端接続用治具に回路部品を装着します。回路全体のセットアップは右の写真と同様です。



課題 1(a)の入力部

1m 長の  
平行 2 本線路 (1)  
表示省略



課題 1(a)の出力部  
(終端開放)

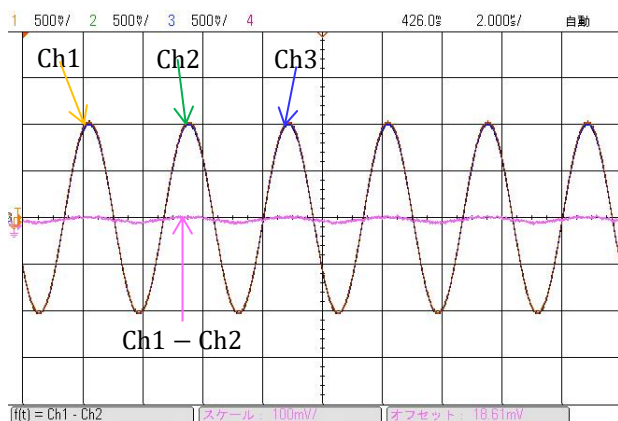
- ・信号発生器の Amplitude (振幅)を 1Vpp に設定します。このとき無負荷時の出力レベルは 2Vpp になっていることに注意してください。(【注意 1】参照)

本セミナーの実験はすべて入力電圧レベルを信号発生器の Amplitude で 1Vpp に設定して行います。

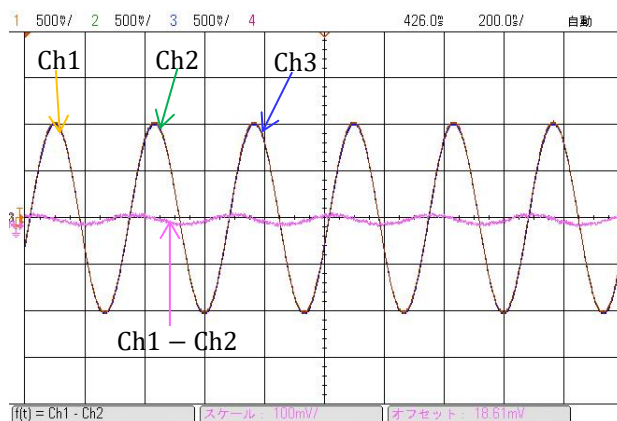


## 実験結果

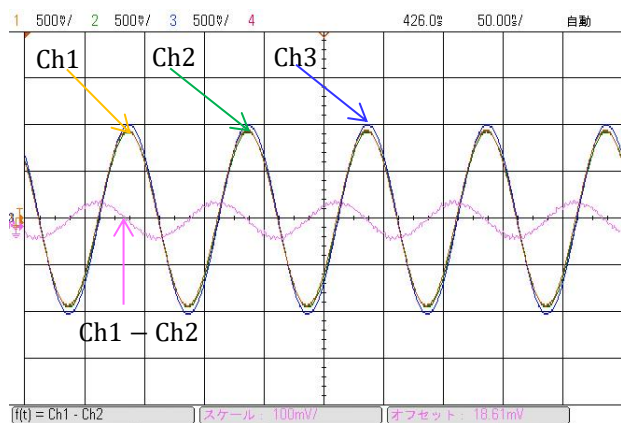
$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$$



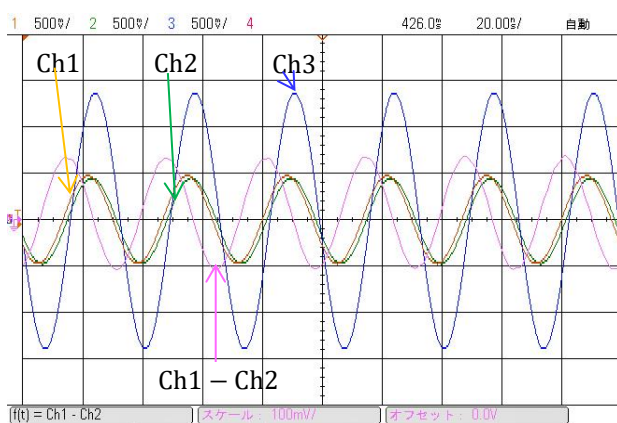
図(1-a) 300kHz



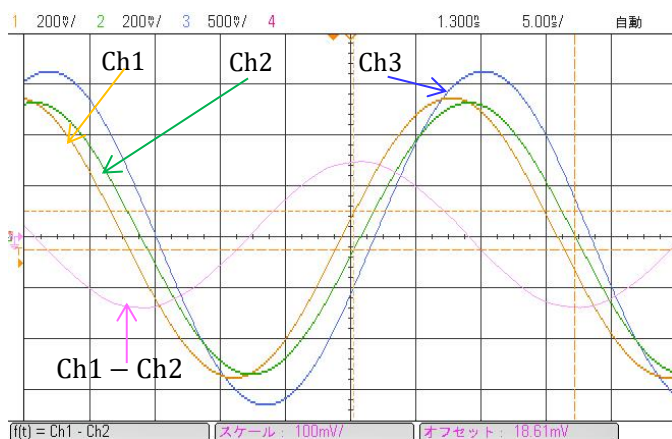
図(1-b) 3MHz



図(1-c) 10MHz



図(1-d) 30MHz



図(1-e) 30MHz (時間軸拡大：カーソル付)

黄色：Ch1 の電圧

= 入力電流測定用抵抗への入力電圧  $v_s(t)$

緑色：Ch2 の電圧

= ケーブル入力端電圧  $v_i(t)$

薄紫色：Ch1 の電圧 - Ch2 の電圧

=  $v_s(t) - v_i(t)$

入力電流  $i_i(t) = \{v_s(t) - v_i(t)\}/R$

青色：Ch3 の電圧 = 出力電圧  $v_l(t)$

上図(1-e)における入力電流測定値の検証：

$\{v_s(t) - v_i(t)\}$ の正のピークに対する  $v_s(t)$ の値： $v_{sp+} = 100\text{mV}$

$\{v_s(t) - v_i(t)\}$ の正のピークに対する  $v_i(t)$ の値： $v_{ip+} = -50\text{mV}$

$v_{sp+} - v_{sp-} = 150\text{mV}$  は $\{v_s(t) - v_i(t)\}$  : 薄紫色の正のピーク値に等しい。

(カーソルを用いた実測により  $150\text{mV}$  であることが確認できます)

従って、入力電流 $i_i(t)$ の正のピーク値は $150\text{mV}/10\Omega = 15\text{mA}$ です。

$\{v_s(t) - v_i(t)\}$ の負のピークに対する $v_s(t)$ の値： $v_{sp-} = -160\text{mV}$

$\{v_s(t) - v_i(t)\}$ の負のピークに対する $v_i(t)$ の値： $v_{ip-} = -10\text{mV}$

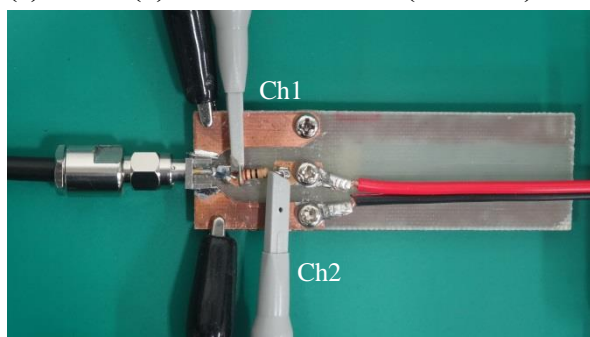
$v_{sp+} - v_{sp-} = -150\text{mV}$  は $\{v_s(t) - v_i(t)\}$  : 薄紫色の負のピーク値に等しい。

(カーソルを用いた実測により  $-150\text{mV}$  であることが確認できます)

従って、入力電流 $i_i(t)$ の負のピーク値は $-150\text{mV}/10\Omega = -15\text{mA}$ です。

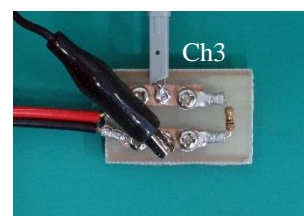
すなわち、 $30\text{MHz}$ における入力電流 $i_i(t)$ の pp 値は  $30\text{mApp}$  であることがわかります。

## (2) 課題 1(b) 終端：抵抗負荷 ( $R = 10\Omega$ )



課題 1(b)の入力部

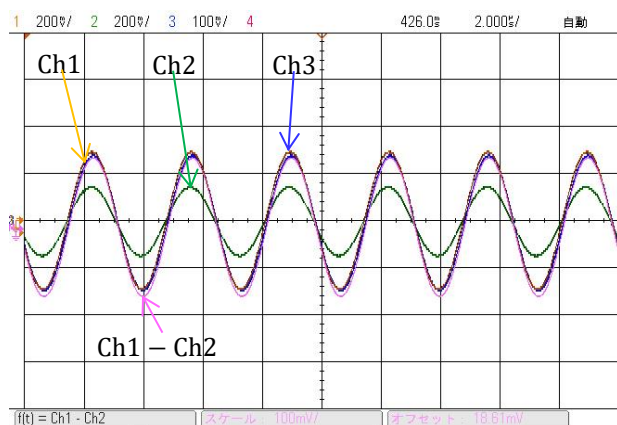
1m 長の  
平行 2 本線路 (1)  
表示省略



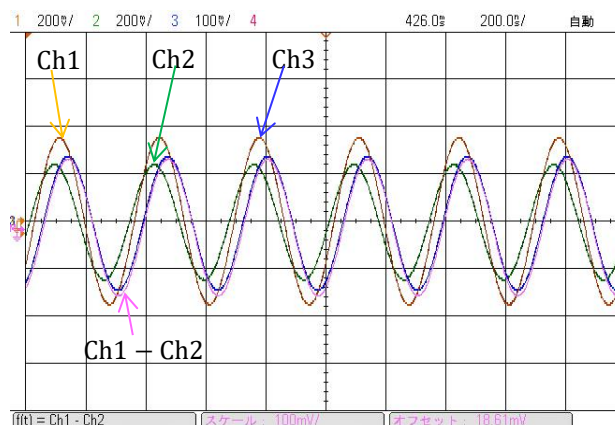
課題 1(b)の出力部  
(抵抗： $10\Omega$ )

## 実験結果

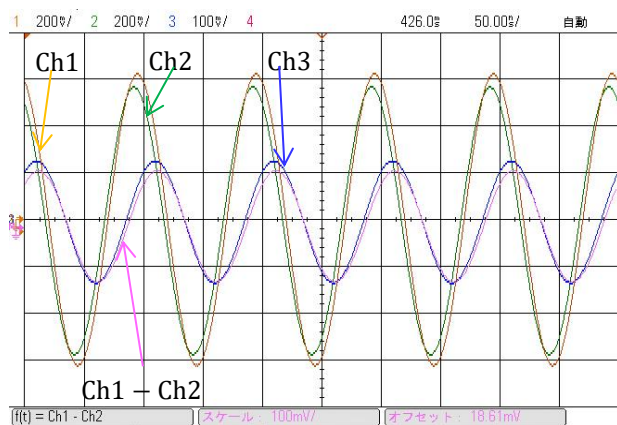
$\text{Ch1} = v_s(t)$ ,  $\text{Ch2} = v_i(t)$ ,  $\text{Ch3} = v_l(t)$ ,  $\text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$



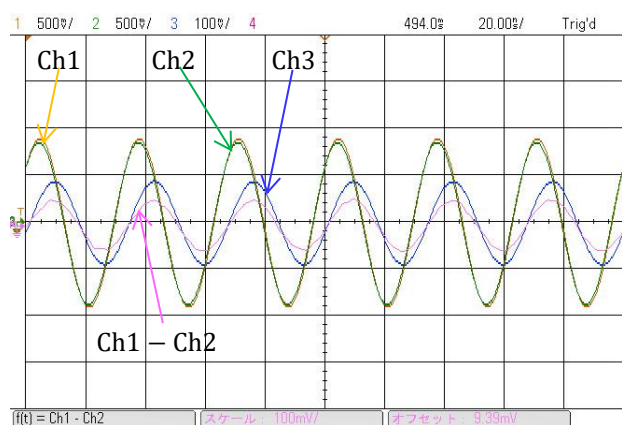
図(2-a) 300kHz



図(2-b) 3MHz

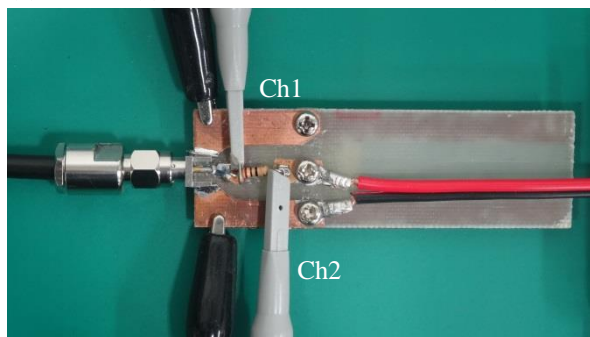


図(2-c) 10MHz



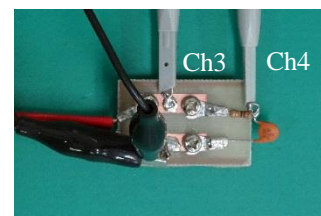
図(2-d) 30MHz

## (2) 課題 1(c) 終端 : キャパシタ負荷 ( $C = 457\text{pF}$ )



課題 1(c)の入力部

1m 長の  
平行 2 本線路 (1)  
表示省略



課題 1(c)の出力部

(キャパシタ :  $457\text{pF}$ 、電流測定用抵抗 :  $10\Omega$ )

終端がキャパシタ負荷とインダクタ負荷の場合には、電流測定のために抵抗( $R = 10\Omega$ )を直列に接続します。使用するオシロスコープでは、p.2 で述べたように電流測定を抵抗両端の電圧差分によって測定する場合、1 つのチャンネルしか表示できないので、電流と電圧の関係を入力側と出力側で別々に表示します。各周波数に対して入力側(左)と出力側(右)を横に並べて示します。

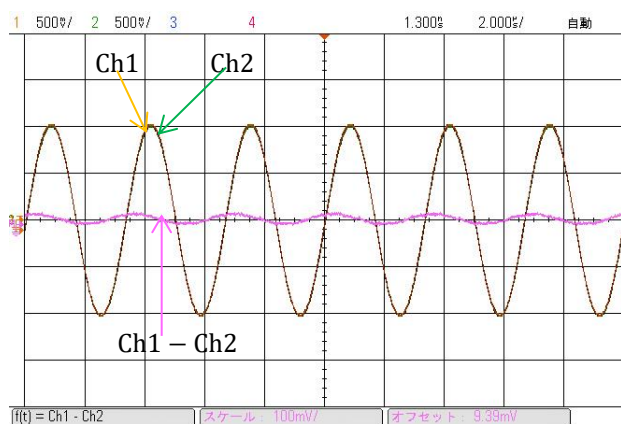
入力電流波形は Ch1 と Ch2 の電圧波形の差分、出力波形は Ch3 と Ch4 の電圧波形の差分で測定します。入力側では Ch2 の電圧  $v_i(t)$  と {Ch1 の電圧( $v_s(t)$ ) - Ch2 の電圧( $v_i(t)$ )} /  $R = i_i(t)$  として換算した電流  $i_i(t)$  を観測し、出力側では Ch4 の電圧  $v_l(t)$  と {Ch3 の電圧( $v_o(t)$ ) - Ch4 の電圧( $v_l(t)$ )} /  $R = i_l(t)$  として換算した電流  $i_l(t)$  を観測します。

個別に測定した入力側と出力側の波形グラフを横に並べて表示しますが、入力波形と出力波形の位相関係を観測する基準とするために、出力側のグラフにも Ch1 の電圧波形を表示しました。

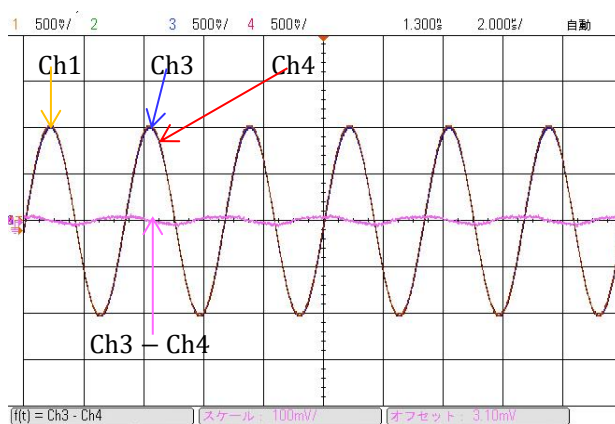
## 実験結果

$\text{Ch1} = v_s(t)$ ,  $\text{Ch2} = v_i(t)$ ,  $\text{Ch3} = v_o(t)$ ,  $\text{Ch4} = v_l(t)$

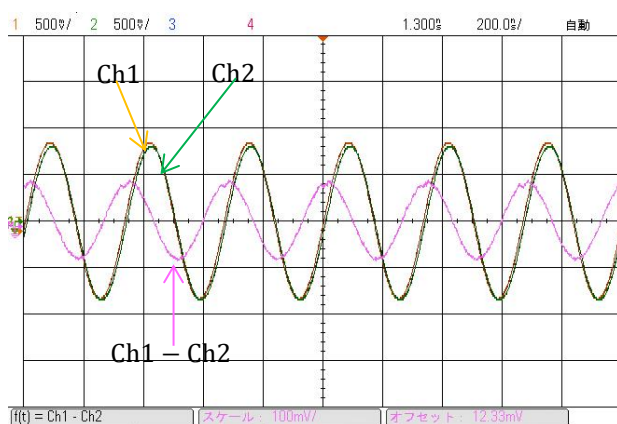
$\text{Ch1} - \text{Ch2} = v_{ci}(t) = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$ ,  $\text{Ch3} - \text{Ch4} = v_{cl}(t) = v_o(t) - v_l(t) = i_l(t) \times R$



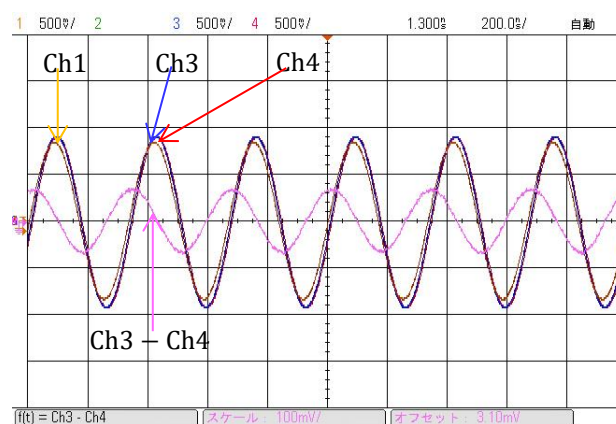
図(3-a-in) 300kHz



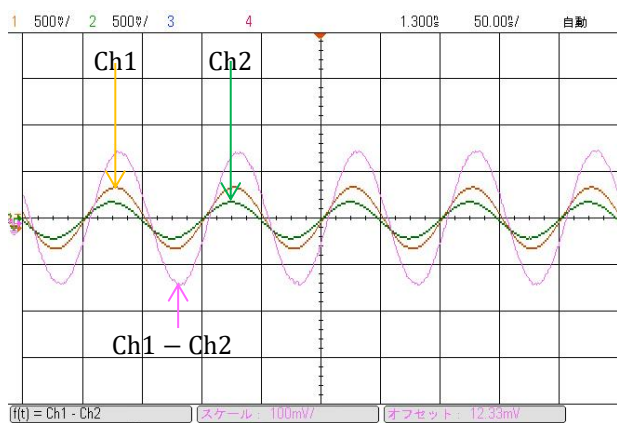
図(3-a-out) 300kHz



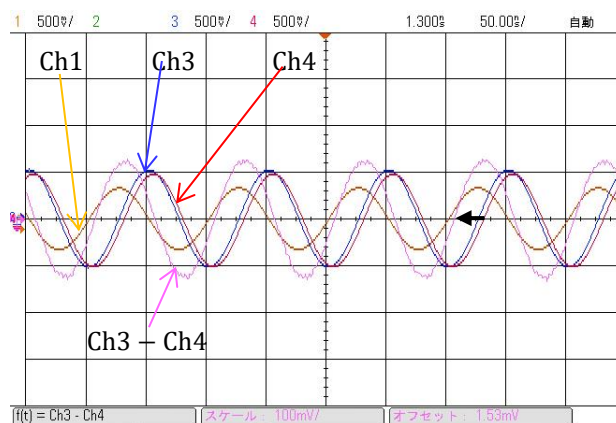
図(3-b-in) 3MHz



図(3-b-out) 3MHz

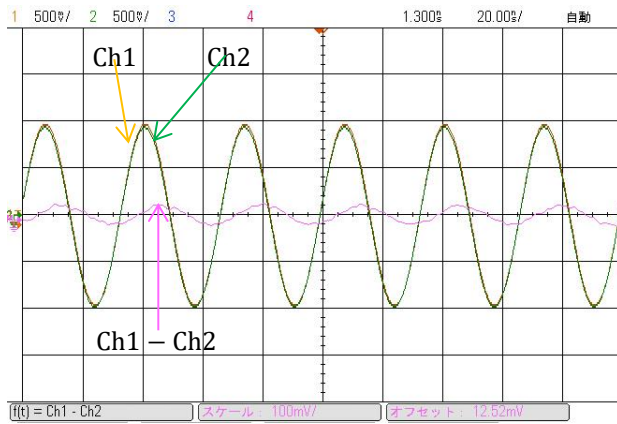


図(3-c-in) 10MHz

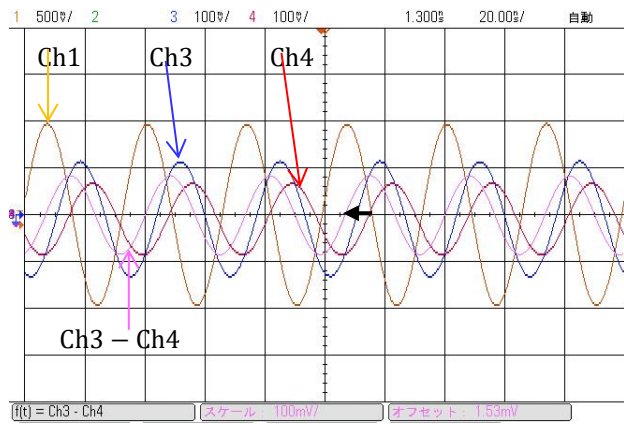


図(3-c-out) 10MHz





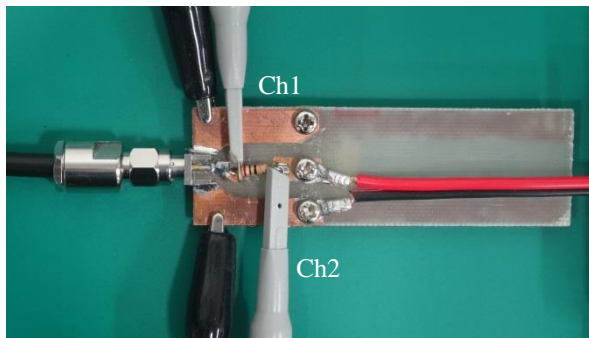
図(3-d-in) 30MHz



図(3-d-out) 30MHz

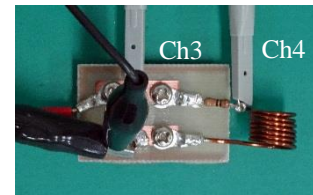
上図の(3-c-out) 10MHz や(3-d-out) 30MHz を見ると、テキストの「1.5 交流における回路素子」で述べられているように、キャパシタでは『電流は電圧より位相が  $90^\circ$  進んでいる』ことがわかります(黒の矢印参照)。

## (2) 課題 1(d) 終端 : インダクタ負荷 ( $L = 0.63\mu\text{H}$ )



課題 1(d)の入力部

1m 長の  
平行 2 本線路 (1)  
表示省略



課題 1(d)の出力部

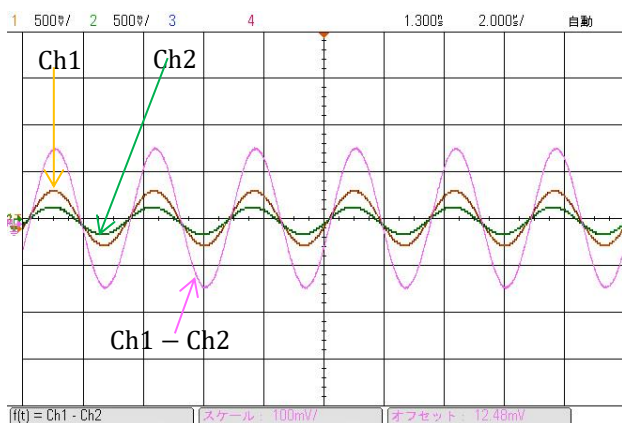
(インダクタ :  $L = 0.63\mu\text{H}$ 、電流測定用抵抗 :  $10\Omega$ )

## 実験結果

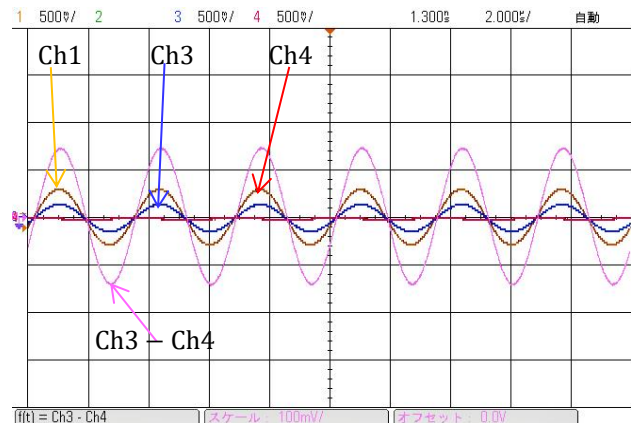
[終端 : キャパシタ負荷] の場合と同様に電流波形と電圧波形を入力側と出力側で別々に表示します。

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_o(t), \text{Ch4} = v_l(t)$$

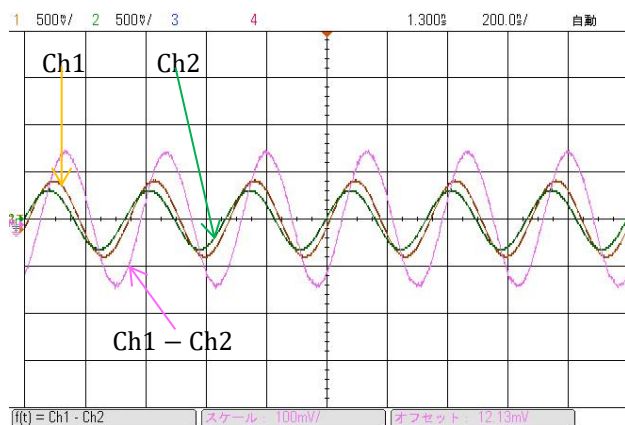
$$\text{Ch1} - \text{Ch2} = v_{ci}(t) = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R, \text{Ch3} - \text{Ch4} = v_{cl}(t) = v_o(t) - v_l(t) = i_l(t) \times R$$



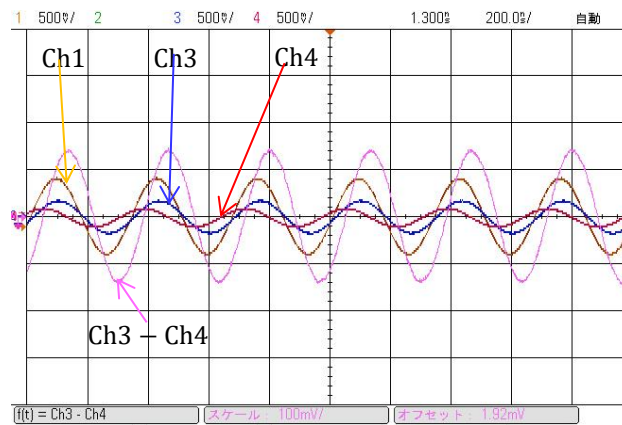
図(4-a-in) 300kHz



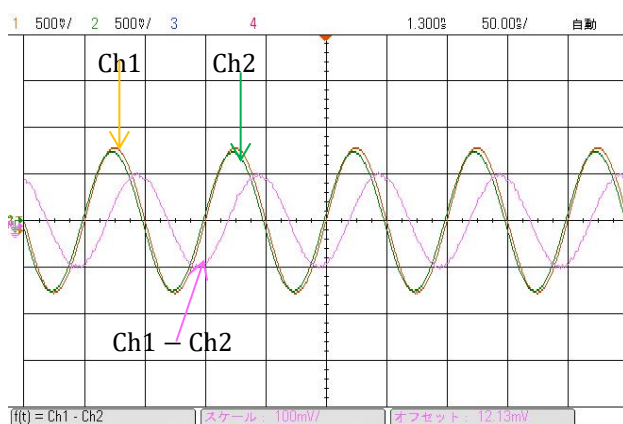
図(4-a-out) 300kHz



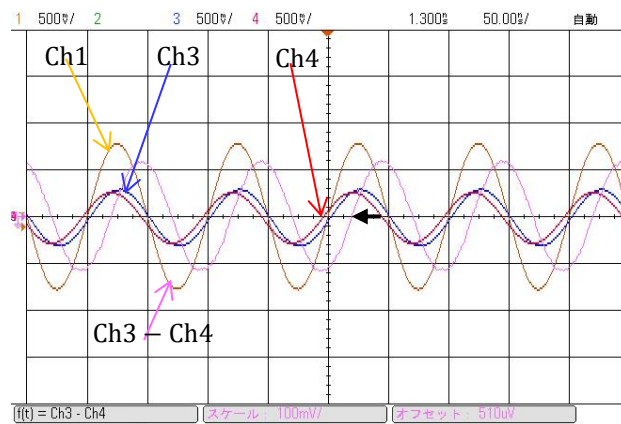
図(4-b-in) 3MHz



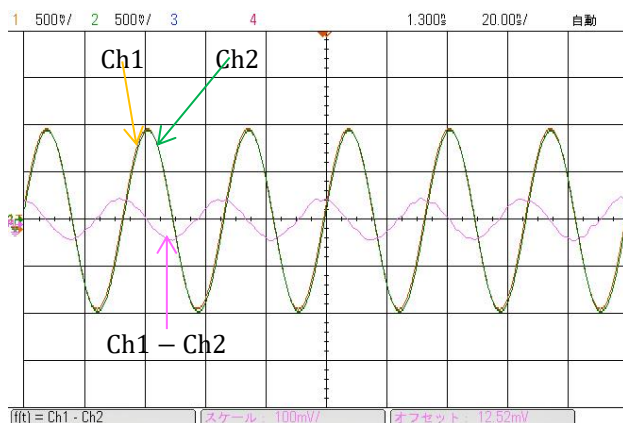
図(4-b-out) 3MHz



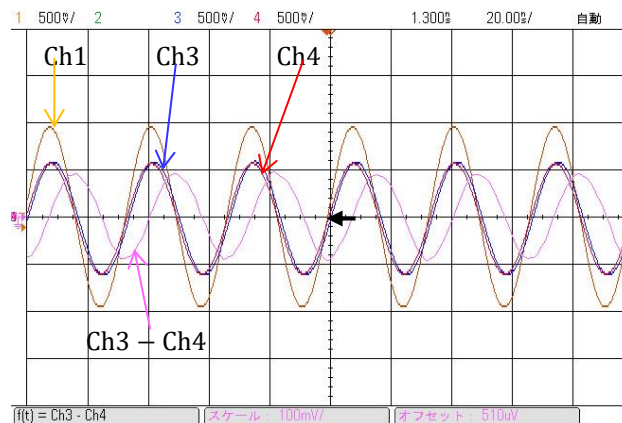
図(4-c-in) 10MHz



図(4-c-out) 10MHz



図(4-d-in) 30MHz



図(4-d-out) 30MHz

上図の(4-c-out) 10MHz や(4-d-out) 30MHz を見ると、テキストの「1.5 交流における回路素子」で述べられているように、インダクタでは『電圧の方が電流より位相が  $90^\circ$  進んでいる』ことがわかります(黒の矢印参照)。



## 2.1 伝送線路は LC 素子の集合

伝送線路は LC の多段接続で等価回路表示されることが知られています。そこで、平行 2 本線路と LC の多段接続回路の周波数特性を比較することによって両者の類似性を確認します。ここでは、バランを用いて平衡伝送線路として実験します。

- (1) まず、バランの特性を確認します。
- (2) 信号供給用治具 B(バラン付)に 3m の平行 2 本線路を接続し、終端開放状態で入力電圧と出力電圧の周波数特性を測定します。
- (3) 信号供給用治具 B(バラン付)に伝送線路を模擬した LC の多段接続回路を接続し、終端開放状態で入力電圧と出力電圧の周波数特性を測定します。

上記(2)および(3)において、100kHz から 30MHz の間で周波数を掃引させた場合の周波数特性と、共振周波数の近傍で単一周波数を変化させた場合について観測します。

### 2.1.1 バランの特性

テキストに掲載されているバランの構成と等価回路を下図に示します。

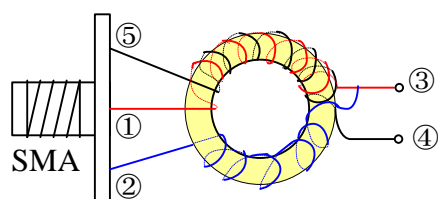


図 2.1-1(a) バランの構成

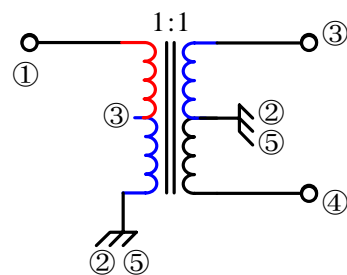
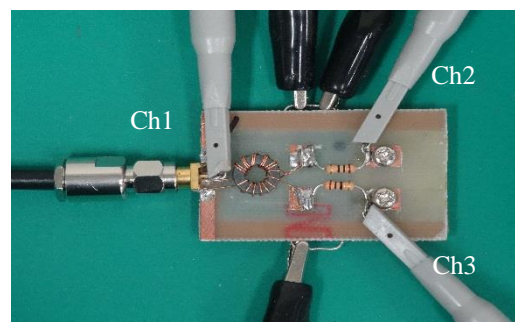


図 2.1-1(b) 等価回路

信号発生器出力の同軸ケーブルに信号供給用治具 B (バラン付)を接続し、上図等価回路の①にオシロスコプの Ch1、③に Ch2、④に Ch3、②と⑤はグラウンドに接続します。  
注：右の写真では③と④に接続された電流測定用抵抗(10Ω)の先端にプローブが接続されていますが、プローブのインピーダンス(1MΩ)が十分大きいので測定誤差は無視できます。



バランの測定回路

### (1) バランの正弦波特性

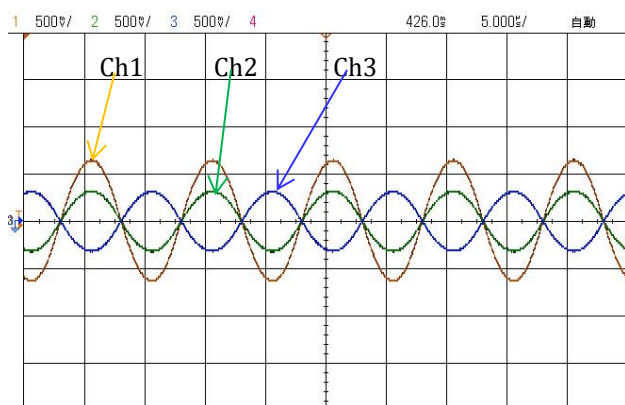


図 2.1-1(c) バランの正弦波応答 (100kHz)

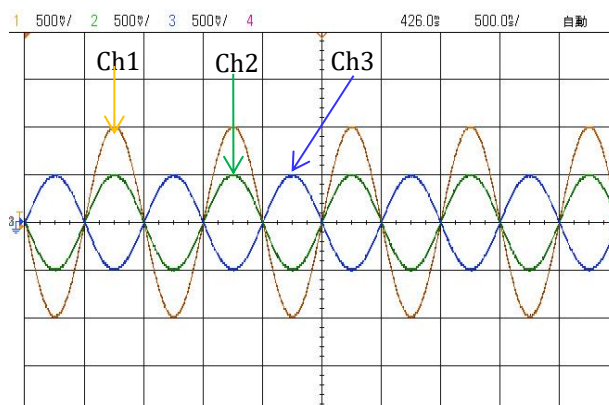


図 2.1-1(d) バランの正弦波応答 (1MHz)

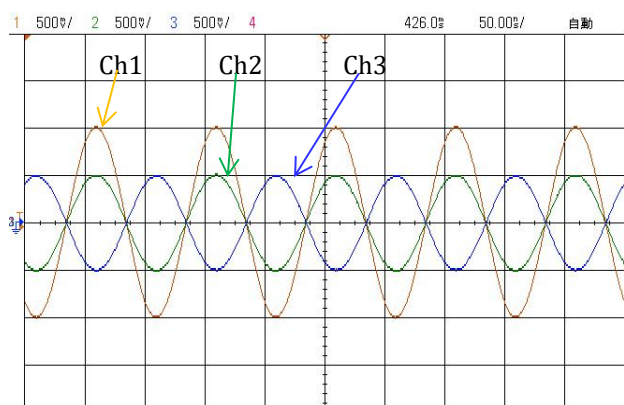


図 2.1-1(e) バランの正弦波応答 (10MHz)

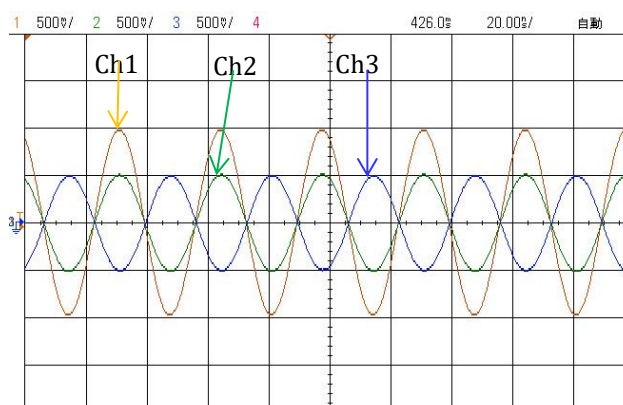


図 2.1-1(f) バランの正弦波応答 (30MHz)

### (2) バランのパルス応答 (繰り返し周波数: 100kHz)

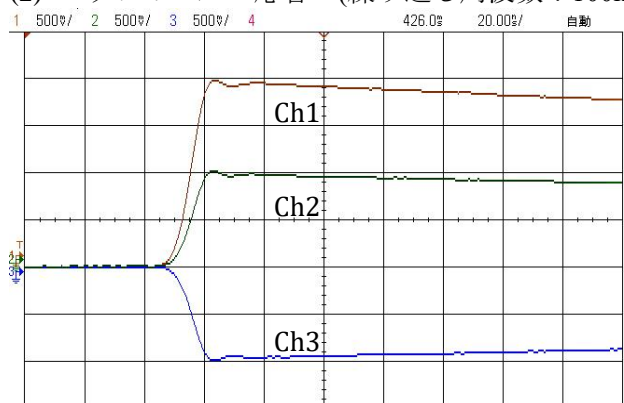


図 2.1-1(g) バランのパルス応答 (立ち上がり部)

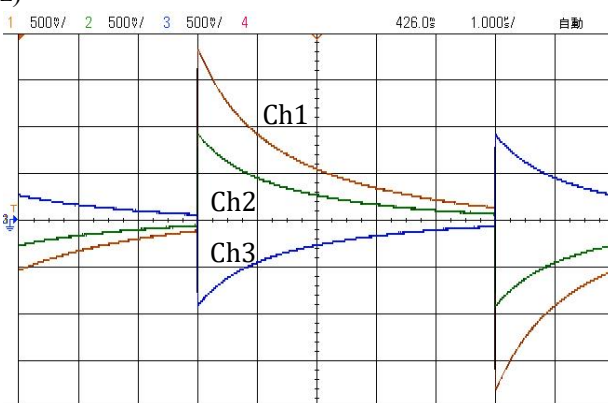


図 2.1-1(i) バランのパルス応答 (1 周期)

### (3) 考察

- 正弦波応答の図 2.1-1(c)～(f)は、周波数 100kHz から 30MHz におけるバランの入出力波形を示しています。図 2.1-1(b)の等価回路における 2 次側の③-②間(Ch2)と④-⑤間(Ch3)の電圧は、この周波数範囲で振幅が等しく位相が反転しており、バランの特性をよく表しています。
- パルス応答の図 2.1-2(g)は、繰り返し周波数 100kHz のパルス波形の立ち上がり部を示しています。

2 次側の③-②間(Ch2)と④-⑤間(Ch3)の電圧は振幅が等しく位相が反転している様子がよく分かります。しかし、1 次側の波形は 0V から立ち上がっています。信号発生器の出力はオフセットが 0V でプラス側とマイナス側に振れているはずですが、そこで、時間軸を 1 $\mu$ sec/section にして 1 周期の波形を観測すると図 2.1-2(i)のようにサグが発生していることが分かります。これはバランの①②間のインダクタンスが低周波では低インピーダンスとなり、両端の電圧が低下するためです。

- 図 2.1-2(j)は、低周波領域で電圧が低下する様子を見るために 20kHz での正弦波応答を測定したものです。図 2.1-2(c)の 100kHz においても 1MHz 以上の場合に比べて電圧レベルは約 65%に低下していますが、20kHz では約 25%になっており、ひずみも生じています。この実験によって、バランの低周波における振る舞いを確認することができます。

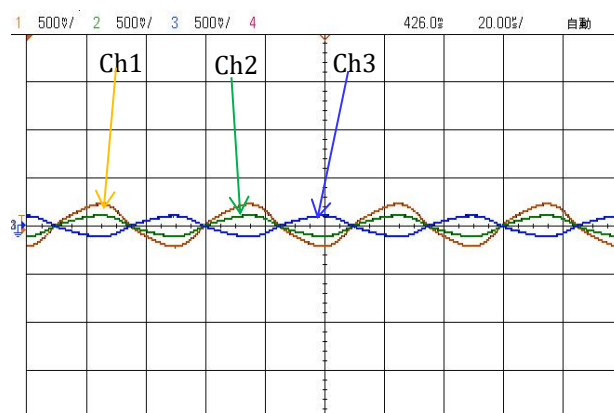


図 2.1-1(j) バランの正弦波応答 (20kHz)

### 周波数掃引特性の検討

正弦波の単一周波数を変化させてバランの低周波数特性を確認しましたが、波形発生器の周波数掃引機能を用いることによって振幅周波数特性を観測することができます。

波形発生器の [Sweep] を押して Sweep を On にして、掃引タイプを Linear に設定します。[Sweep Tme]を 1sec、[Start Freq]を 100kHz、[Storp Freq]を 30MHz に設定します。

[Trigger]を押すと表示される 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。測定結果を図 2.1-1(k)に示します。Ch2 と Ch3 は重なっているために、ここでは Ch3 が見えています。

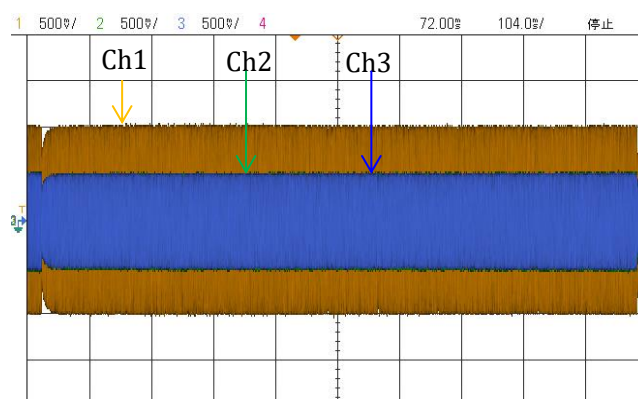


図 2.1-1(k) バランの周波数掃引特性

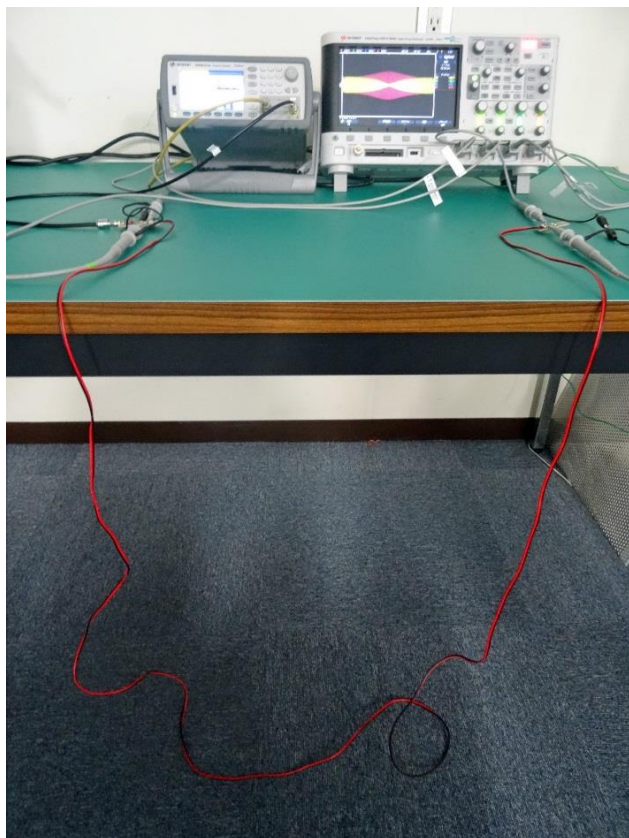
[Sweep Time]を 1sec に設定したので、図 2.1-1(k)の横軸を左端から右端まで掃引するのに 1sec かかることとなります。1 マスを 100msec にすると、端から端まで 1sec になりますが、掃引の開始と終わりの位置がはっきり認識できる方が分かりやすいと考えて、1 コマを 104msec ( $3\text{MHz}/1.04 \cong 2.885\text{MHz}$ )に設定しました。今後、測定する掃引波形の時間軸は、すべて 1 コマ 104msec に設定しています。

図 2.1-1(k)の左側に落ち込みがある場所が掃引開始、右側の落ち込みがあるところが掃引終了を示しています。100kHz から掃引を開始していますが、400～500kHz 近辺でほぼ最大振幅となり、最高周波数の 30MHz まで平坦な特性を示していることが分かります。

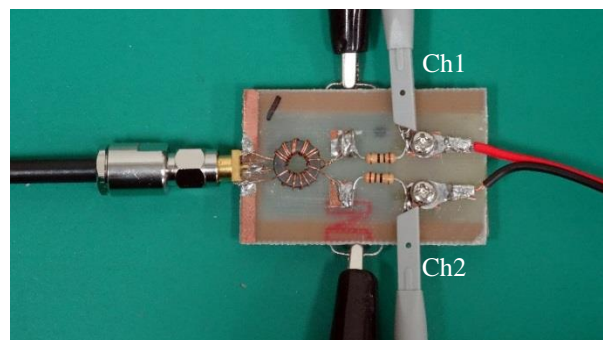


### 2.1.2 平行2本線(3m)を用いた平衡伝送線路の実験

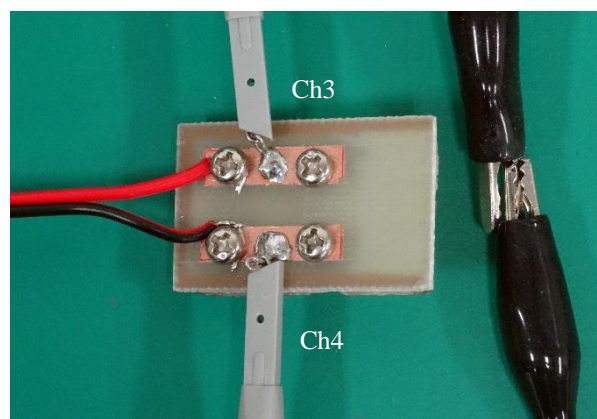
バランを用いて3mの平行2本線で平衡伝送線路を構成し、終端開放状態での伝送線路の基本的な周波数特性を確認します。左下の写真は実験のセットアップ、右上側が入力回路、右下側が終端回路です。図2.1-1(b)のバランの等価回路における②⑤はオシロスコープのグラウンドに接続されているので、右下の終端回路でオシロスコープのグラウンドがどこにも接続されていませんが、②⑤と同電位になっていることに注意してください。



実験のセットアップ



入力部



終端部

#### 周波数掃引特性

3mの平行2本線による平衡伝送線路の周波数特性は単一周波数を変えるだけでは、全体像を把握しにくいので周波数を掃引」と記述させて測定しました。

掃引パラメータ：スタート周波数 100kHz、ストップ周波数 30MHz スイープ時間 1sec

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \text{Ch3} = v_{lp}(t), \text{Ch4} = v_{lm}(t)$$

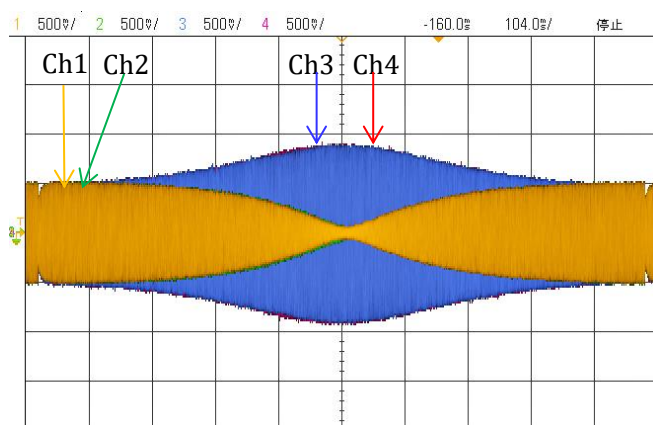


図 2.1-2(a) 入出力信号の周波数掃引特性

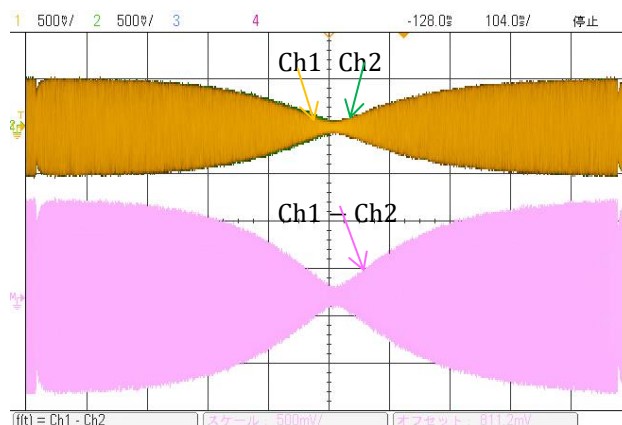


図 2.1-2(b) 入力信号の周波数掃引特性 (差動信号)

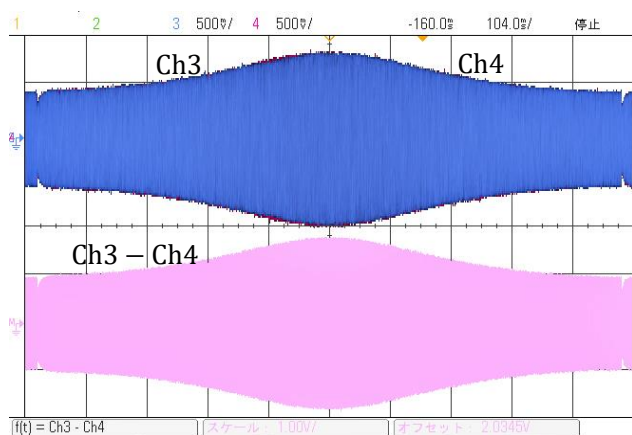


図 2.1-2(c) 出力信号の周波数掃引特性 (差動信号)

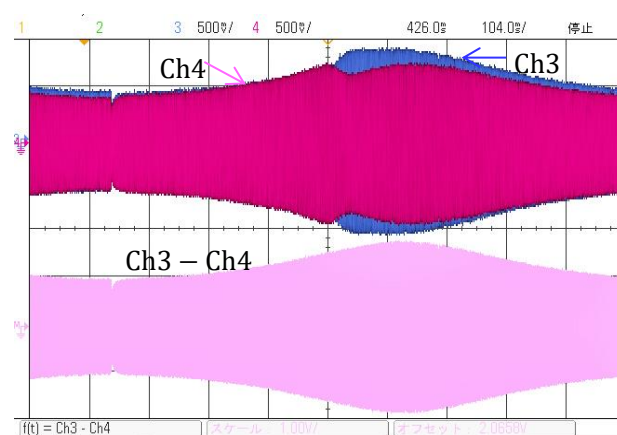


図 2.1-2(d) 反射を含む出力信号の場合

- ・ 図 2.1-2(a)の入出力信号の周波数掃引特性から、この伝送線路は掃引区間のほぼ中央で共振していることがわかります。次に、単一正弦波を入力して共振点近傍の振幅と位相を測定しますが、その結果、共振点は約 16MHz であることがわかります。
- ・ 図 2.1-2(d)は反射による振幅ひずみが生じている様子を示しています。3m の平行 2 本線を「実験のセットアップ」の写真で示すように実験機から垂らすように配置すると、比較的反射の少ない状態で実験できますが、場合によっては図 2.1-2(d)のような「ひずみ」が生じます。出力端のプラス側とマイナス側の振幅はひずんでいますが、差分をとるとひずみの無い信号が得られます。この実験によって、平衡伝送回路で差動信号を伝送する利点を確認できます。

## 単一周波数特性

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \text{Ch3} = v_{lp}(t), \text{Ch4} = v_{lm}(t)$$

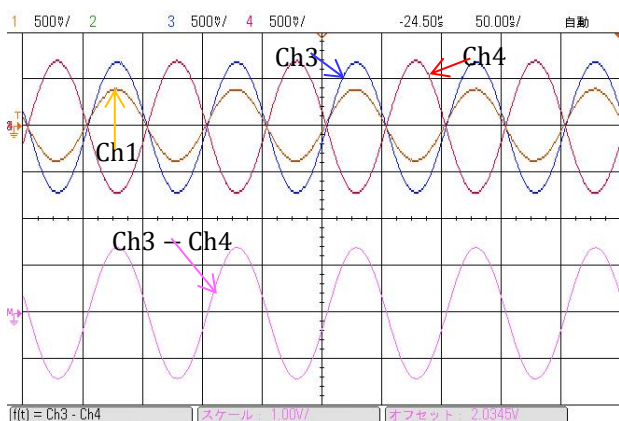


図 2.1-2(e) 10MHz

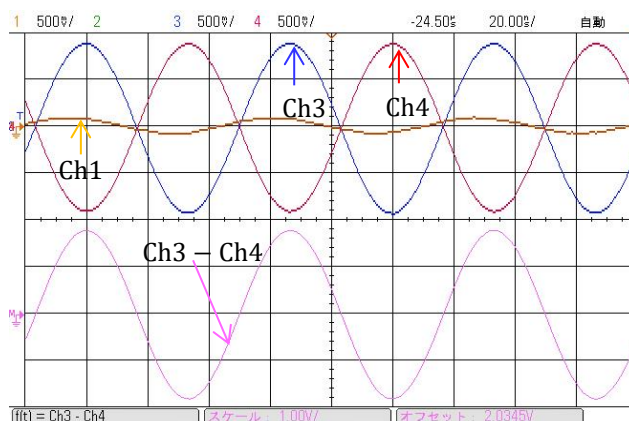


図 2.1-2(f) 15MHz

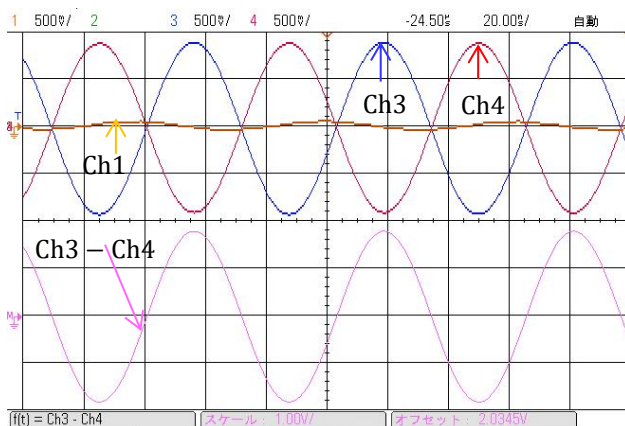


図 2.1-2(g) 16MHz

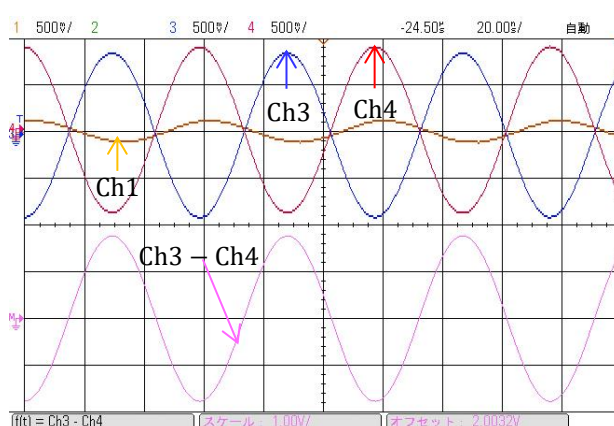


図 2.1-2(h) 17MHz

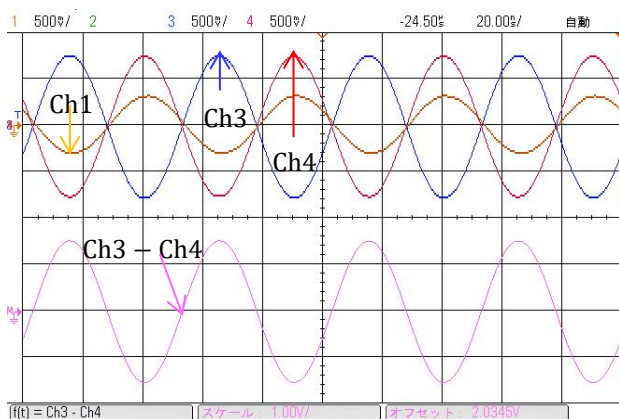


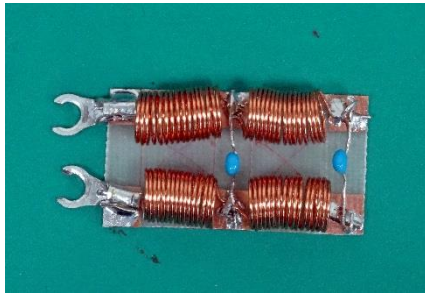
図 2.1-2(i) 20MHz

- 図 2.1-2(g)より、約 16MHz で入力信号が最小になることがわかり、図 2.1-2(a)の共振周波数が約 16MHz であることが確認できます。
- 共振周波数(16MHz)より低い 10MHz では Ch1 の信号の位相は Ch3 と同位相ですが、それより高い 17MHz では Ch1 と Ch4 が同位相になっており、共振周波数の前後で入力信号と出力信号の位相関係が反転していることが確認できます。

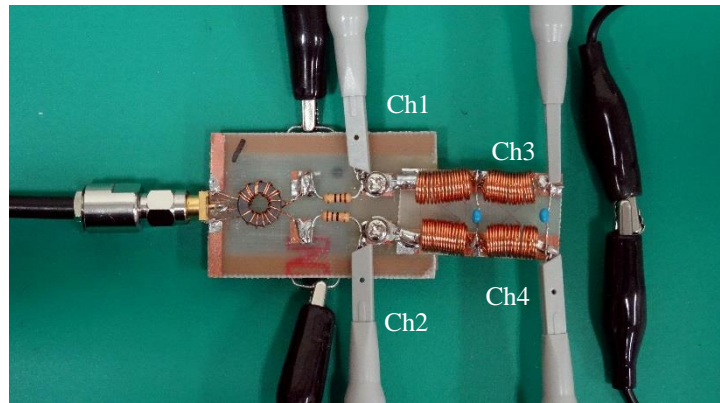
### 2.1.3 LC 素子の多段接続回路による擬似伝送線路の実験

伝送線路は LC 素子の多段接続によって等価回路表示できることが広く知られています。ここでは、インダクタンス 4 個、キャパシタンス 2 個で構成した平衡形模擬伝送線路を用いて、平行 2 本線路の場合と同様の周波数測定を行い、LC 素子の多段接続回路が伝送線路を模擬していることを確認します。





LC 多段接続回路  
( $L = 1.1\mu\text{H}$ ,  $C = 56\text{pF}$ )



実験のセットアップ

### 周波数掃引特性

LC 多段接続回路による模擬平衡伝送線路の周波数特性の全体像を把握するため、周波数をさせて測定しました。

掃引パラメータ：スタート周波数 100kHz、ストップ周波数 30MHz スイープ時間 1sec

$\text{Ch1} = v_{ip}(t)$ ,  $\text{Ch2} = v_{im}(t)$ ,  $\text{Ch3} = v_{lp}(t)$ ,  $\text{Ch4} = v_{lm}(t)$

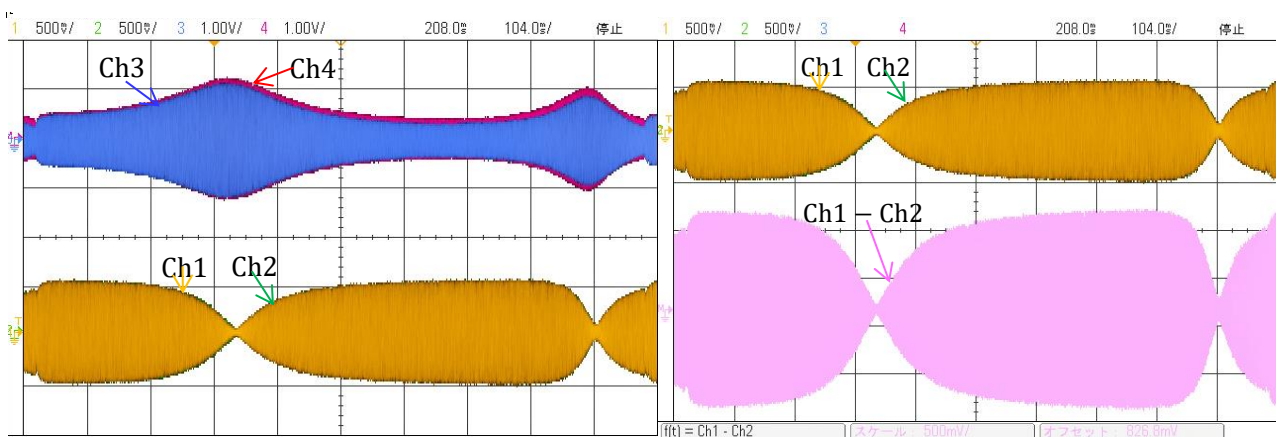


図 2.1-3(a) 入出力信号の周波数掃引特性

図 2.1-3(b) 入力信号の周波数掃引特性 (差動信号)

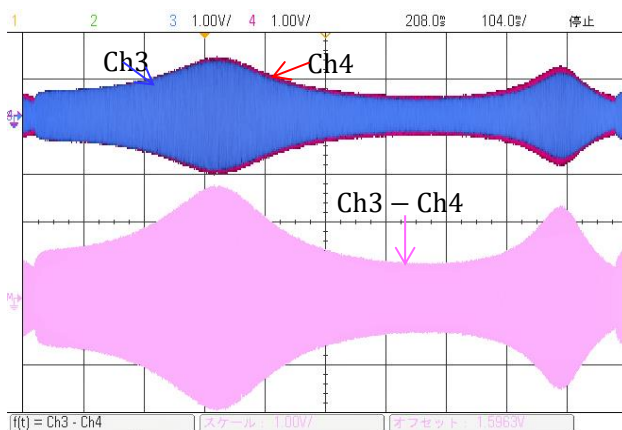


図 2.1-3(c) 信号の周波数掃引特性 (差動信号)

### 単一周波数特性

- ・図 2.1-2(a)では共振点が一つだけ観測されましたが、図 2.1-3(a) には共振点が約 10MHz と 27MHz で見られます。これは LC 多段接続回路が 3m 長の平行 2 本線路より長い伝送線を模擬しているためです。
- ・図 2.1-3(a)の共振点 10MHz 近傍の特性は図 2.1-2(a)の特性に近似しており、LC 多段接続回路が伝送線を模擬していることが分かります。

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \text{Ch3} = v_{lp}(t), \text{Ch4} = v_{lm}(t)$$

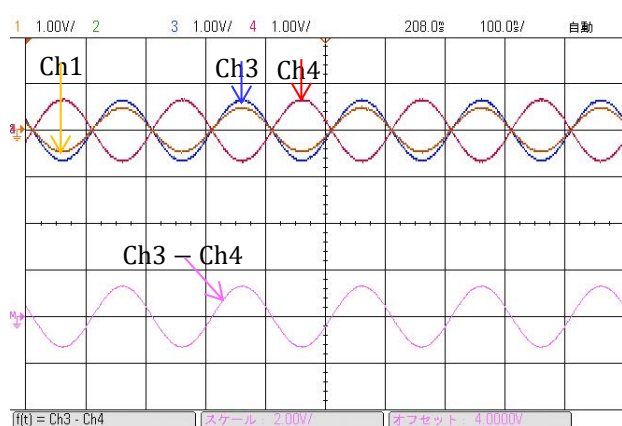


図 2.1-3(d) 5MHz

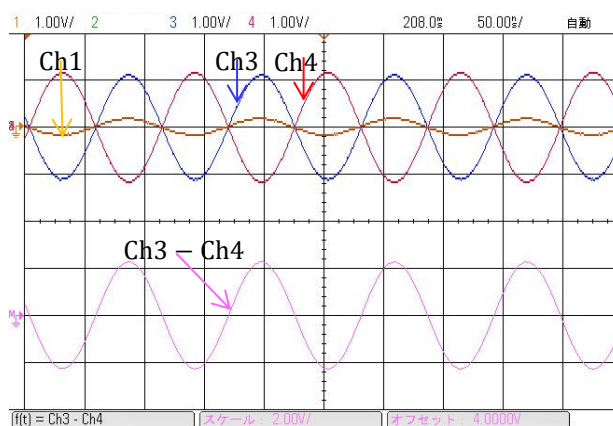


図 2.1-2(e) 9MHz

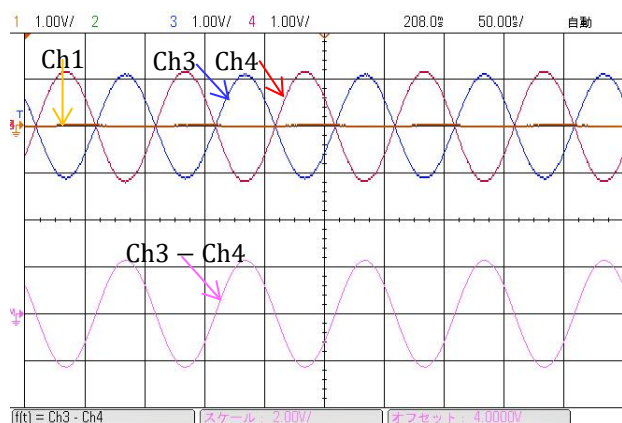


図 2.1-3(f) 10MHz

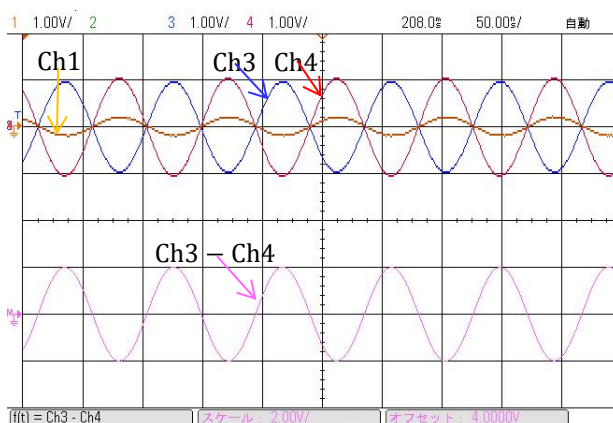


図 2.1-2(g) 11MHz

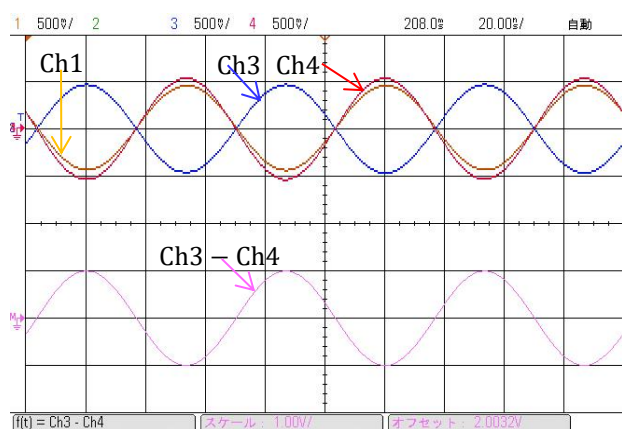


図 2.1-2(h) 15MHz

- ・ 図 2.1-3(f)より、約 10MHz で入力信号が最小になることがわかり、図 2.1-3(a)の低い方の共振周波数が約 10MHz であることが確認できます。
- ・ 共振周波数(10MHz)より低い 5MHz では Ch1 の信号の位相は Ch3 と同位相ですが、それより高い 15MHz では Ch1 と Ch4 が同位相になっており、共振周波数の前後で入力と出力の位相関係が反転していることを確認できます。この点からも、実験に使用した LC 多段接続回路は伝送線路を模擬していることが分かります。

## 2.2 伝送線路の電磁界と線路電圧電流 (課題 2) 【参考実験】

**注：**本実験で使用する実験試料を複数用意できなかったため、講師が代表して実験します。

平行 2 本線路が作る電磁界成分を磁界プローブ(微小コイル)および電界プローブ(微小ダイポール)で測定します。この線路系では、電磁界が外部に漏れていること、また線路方向には電磁界がなく、線路断面における電磁界のみが存在することを確認します。

使用する磁界プローブと電界プローブの写真を示します。



磁界プローブ



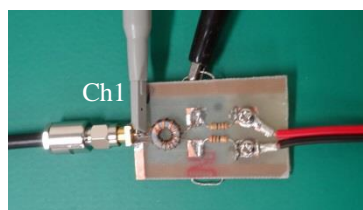
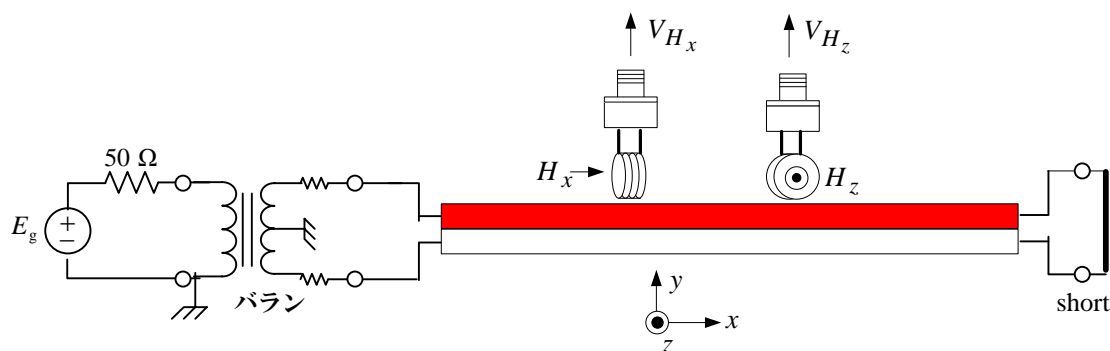
電界プローブ

磁界プローブは線路方向と線路断面方向の磁界をオシロスコープで同時に測定できるように、線路方向のプローブと線路断面方向のプローブを一体化してあります。

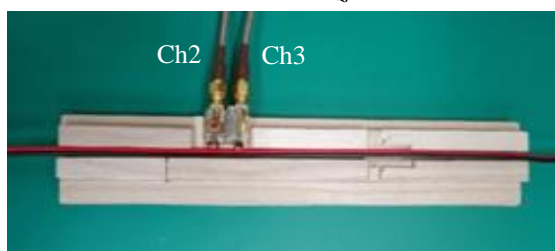
電界プローブは線路方向のプローブと線路断面方向のプローブを近接させると電界の乱れが大きくなり正しい測定ができないので、左の写真と同じものを 2 個用意しました。

### 磁界測定 (終端：短絡)

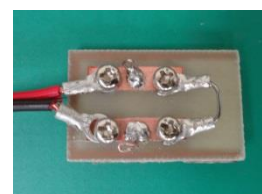
テキストの図 2.12 と実験に用いた線路およびプローブの部分の写真を示します。信号発生器から周波数 18MHz、振幅 1V<sub>pp</sub> の正弦波を、バランを介した終端短絡の平衡線路に供給します。



入力部



磁界プローブによる測定



出力部(終端短絡)



磁界プローブの  
拡大図

$$\text{Ch2} = V_{H_x}, \text{Ch3} = V_{H_z}$$



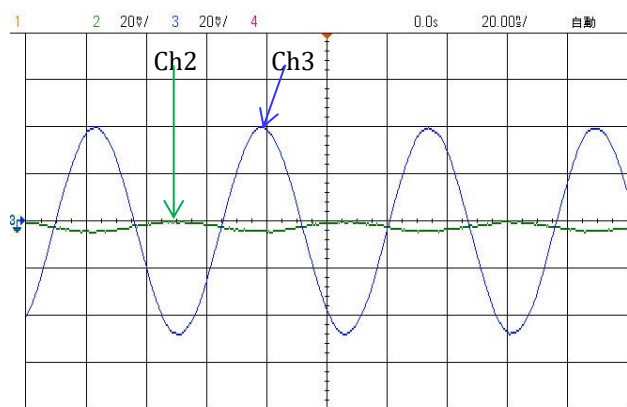
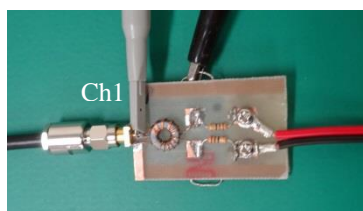
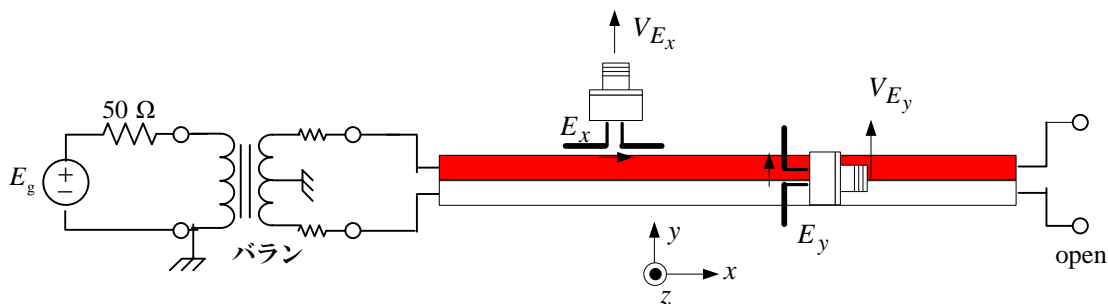


図 2.2-1 磁界プローブによる測定結果

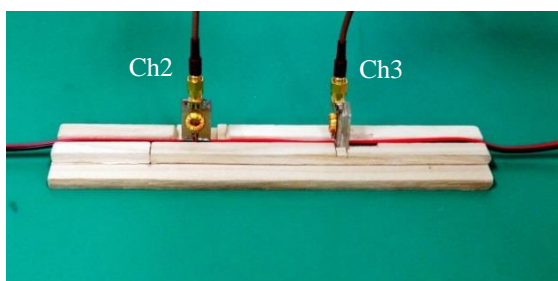
オシロスコープのプローブ Ch2 に  $V_{H_x}$  測定用、Ch3 に  $V_{H_z}$  測定用の磁界プローブを SMA コネクタ付の同軸ケーブルで接続します。Ch1 はオシロスコープのトリガ用とし、波形グラフには表示してありません。測定結果から、線路方向の磁界成分 ( $V_{H_x}$ ) は線路断面における磁界 ( $V_{H_z}$ ) に比べて小さいことが分かります。

### 電界測定 (終端：開放)

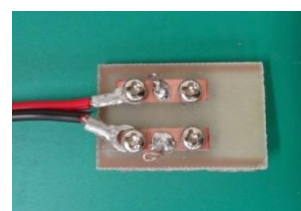
テキストの図 2.13 と実験に用いた線路およびプローブの部分の写真を示します。信号発生器から周波数 18MHz、振幅 1V<sub>pp</sub> の正弦波を、バランを介した終端開放の平衡線路に供給します。



入力部



電界プローブによる測定

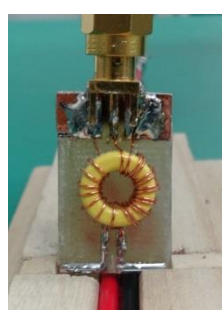


出力部(終端開放)

Ch2 =  $V_{E_x}$ , Ch3 =  $V_{E_y}$



(線路方向)



(線路断面方向)

電界プローブの拡大図

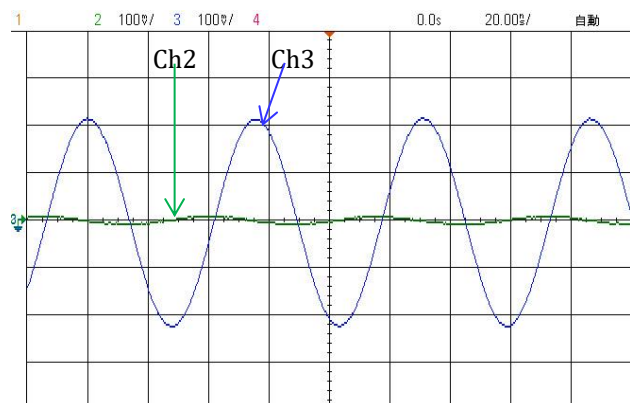


図 2.2-2 電界プローブによる測定結果

オシロスコープのプローブ Ch2 に  $V_{E_x}$  測定用、Ch3 に  $V_{E_z}$  測定用の電界プローブを SMA コネクタ付の同軸ケーブルで接続します。Ch1 はオシロスコープのトリガ用とし、波形グラフには表示してありません。測定結果から、線路方向の電界成分 ( $V_{E_x}$ ) は線路断面における電界 ( $V_{E_y}$ ) に比べて小さいことが分かります。

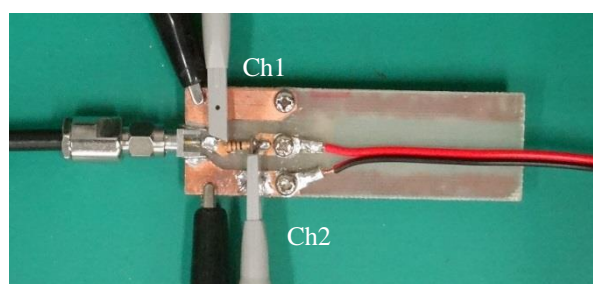
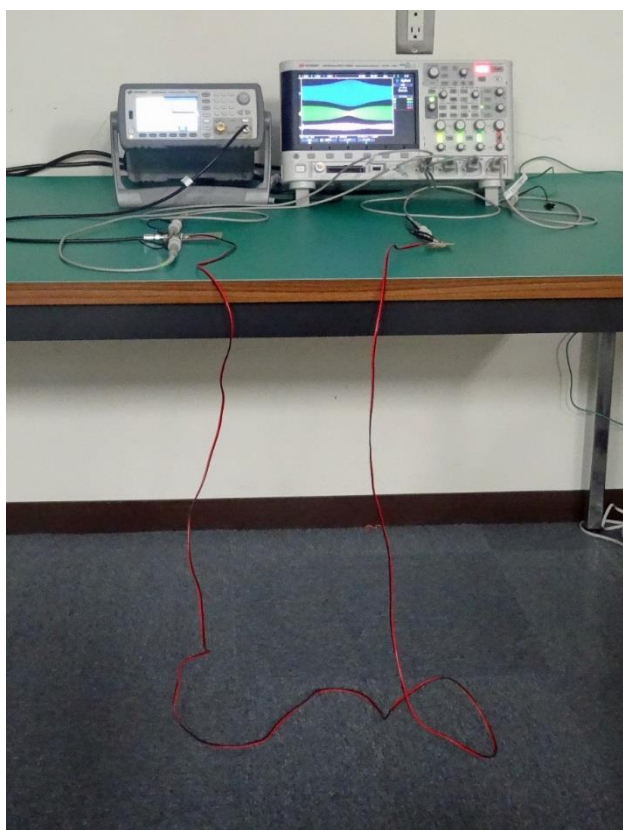
## 2.8 入射波と反射波と透過波

### 課題 3

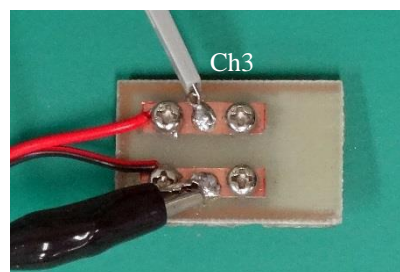
ケーブル長 3m の平行 2 本線路および同軸線路について終端開放と終端短絡の場合の周波数特性を測定します。入力電圧、入力電流および出力電圧の周波数掃引特性を測定し、共振や反共振が現れる様子を観測します。入力電圧を入力電流で割り算すると入力インピーダンス( $Z_{in}$ )が求められます。共振点では $Z_{in}$ が最小(無損失線路ではゼロ)となり、反共振点では $Z_{in}$ が最大(無損失線路では $\infty$ )になります。また、共振周波数や反共振周波数とその近傍周波数(4 点)における正弦波形を測定し、入力電圧、入力電流および出力電圧の振幅と位相の関係を観測します。なお、参考データとしてケーブル長 7.2m の同軸線路の特性も示しました。

#### 2.8.1 課題 3-1 平行 2 本線路の周波数応答

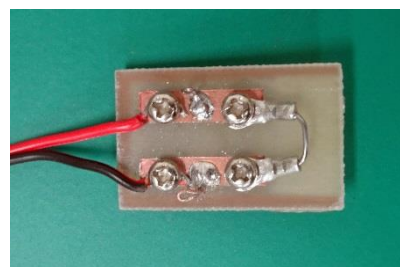
##### (1) ケーブル長 3m



入力部



出力部(終端開放)



出力部(終端短絡)



・ 終端開放

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$$

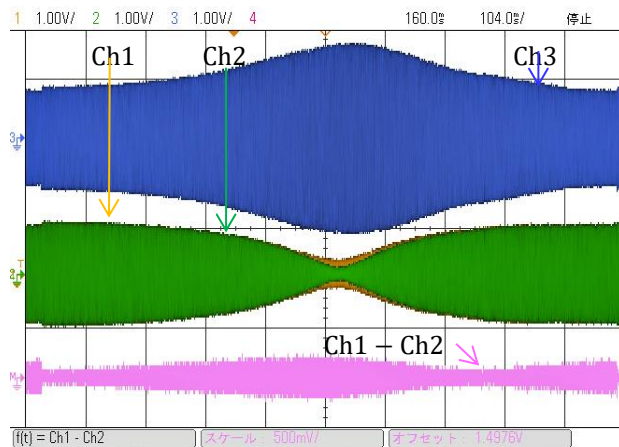


図 2.8-1-a 3m 周波数掃引特性

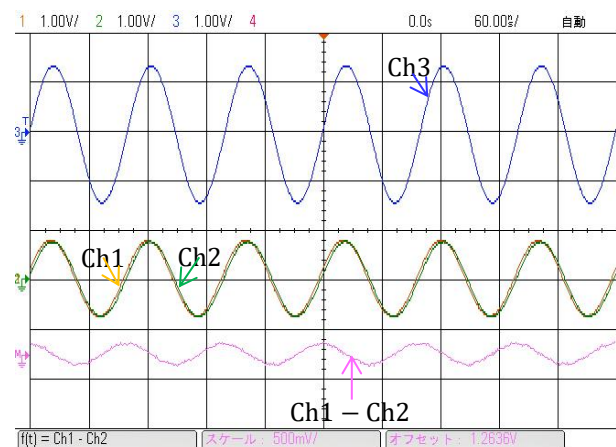


図 2.8-1-b 10MHz

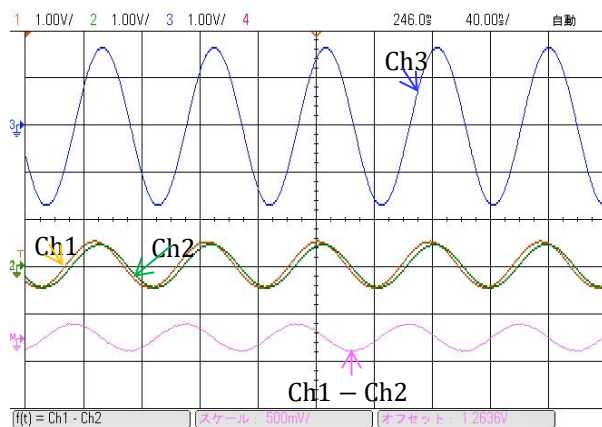


図 2.8-1-c 13MHz

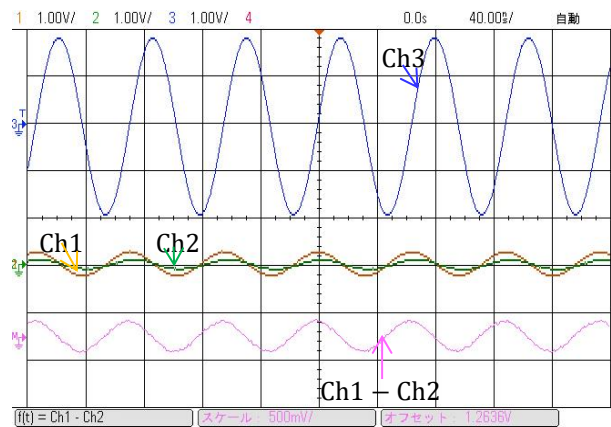


図 2.8-1-d 15.5MHz

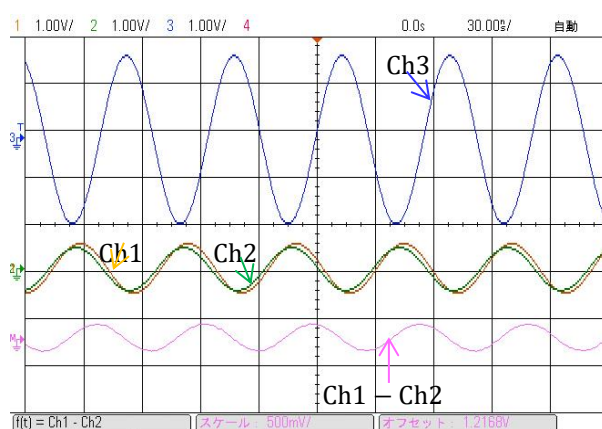


図 2.8-1-e 18MHz

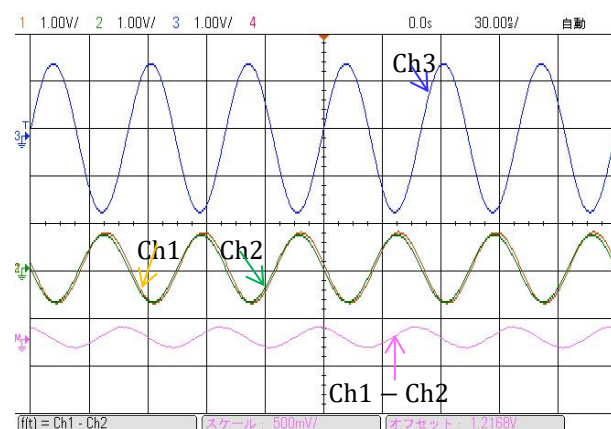


図 2.8-1-f 20MHz

・ 終端短絡

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$$

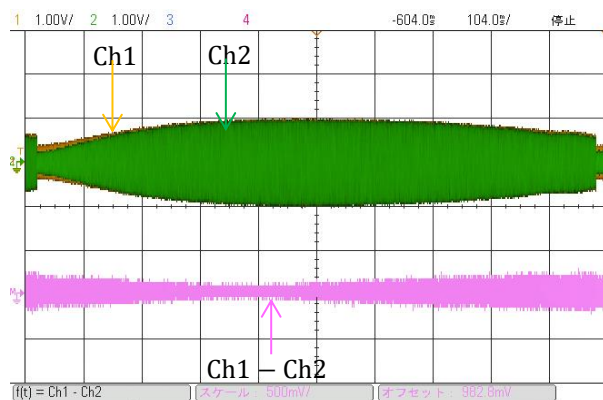


図 2.8-1-g 周波数掃引特性

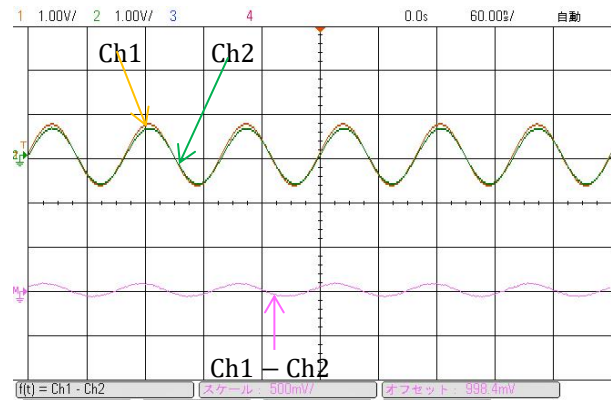


図 2.8-1-h 10MHz

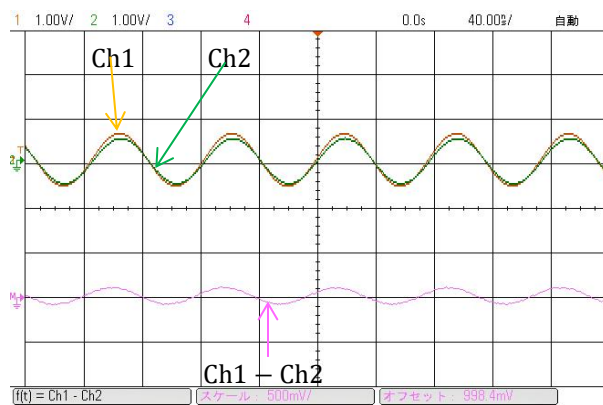


図 2.8-1-i 13MHz

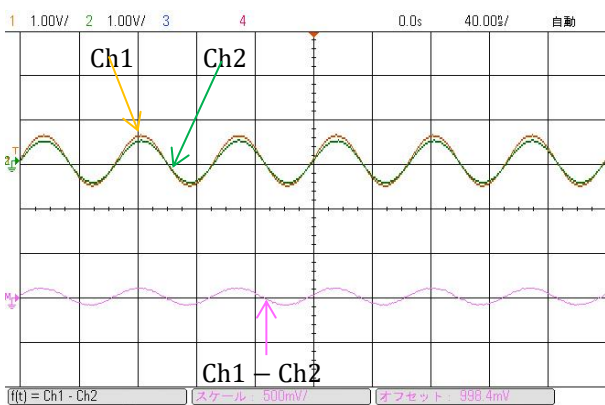


図 2.8-1-j 15.5MHz

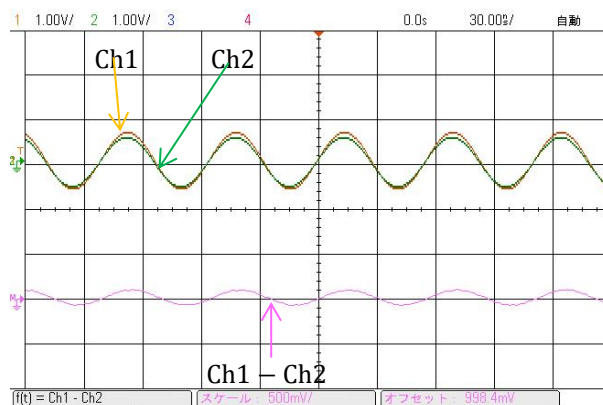


図 2.8-1-k 18MHz

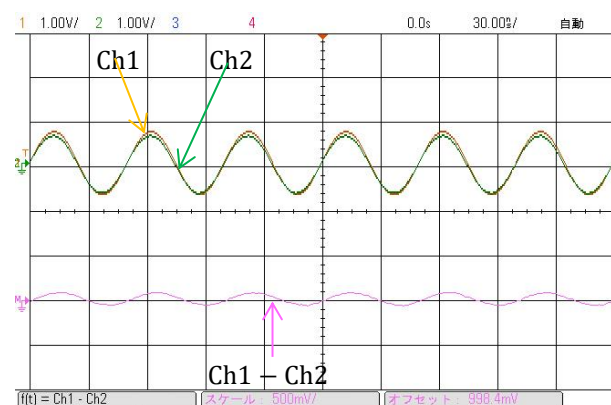
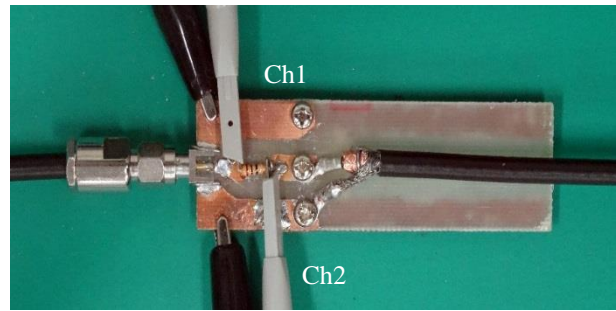
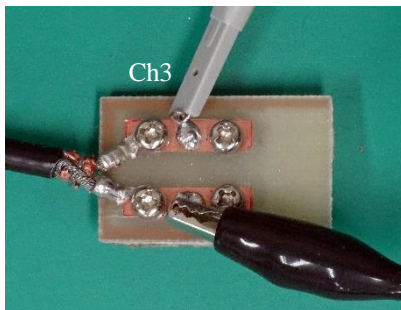


図 2.8-1-l 20MHz

## 2.8.2 課題 3-2 同軸線路の周波数応答



入力部



出力部(終端開放)



出力部(終端短絡)

### (1) ケーブル長 3m

#### ・終端開放

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_l(t) \times R$$

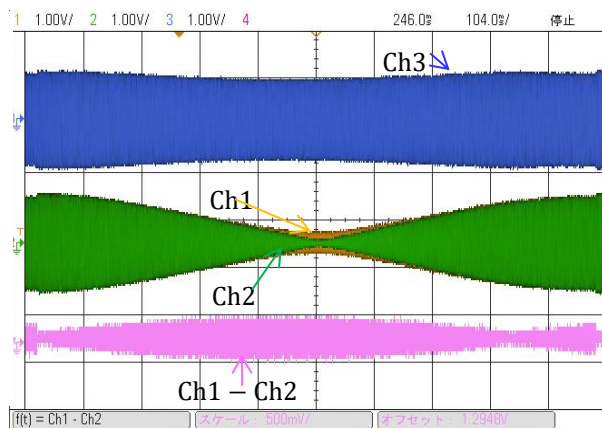


図 2.8-2-a 周波数掃引特性

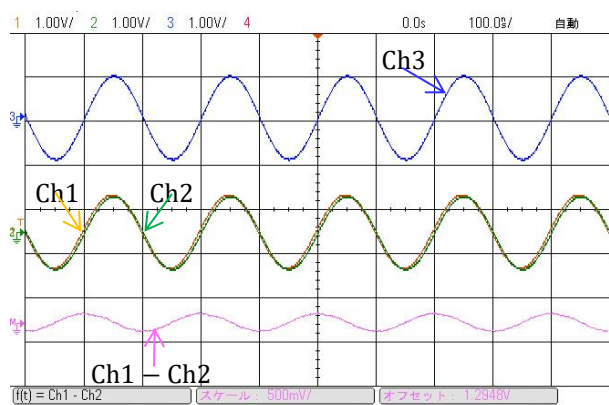


図 2.8-2-b 5MHz



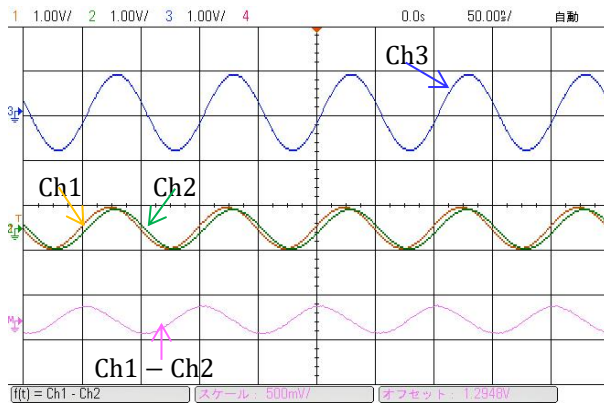


図 2.8-2-c 10MHz

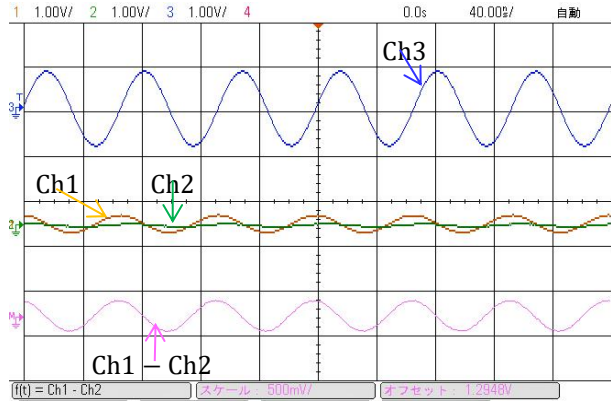


図 2.8-2-d 15MHz

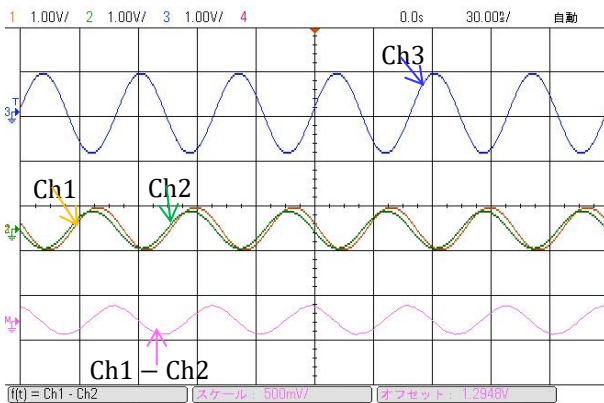


図 2.8-2-e 20MHz

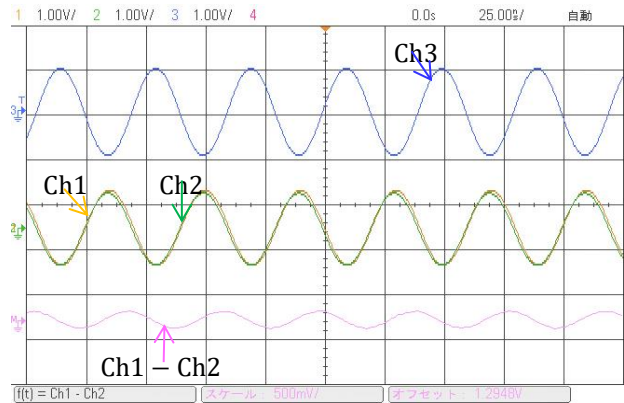


図 2.8-2-f 25MHz

### ・ 終端短絡

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_l(t) \times R$$

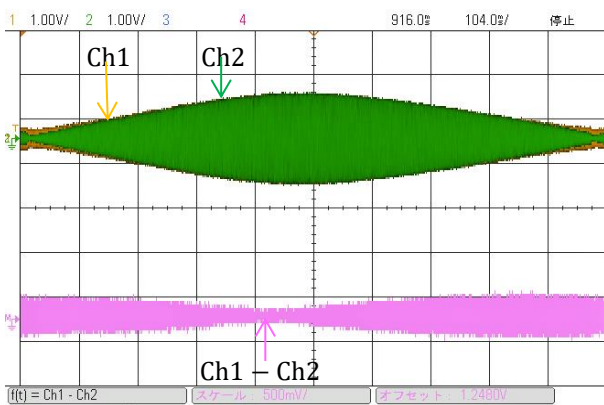


図 2.8-2-g 周波数掃引特性

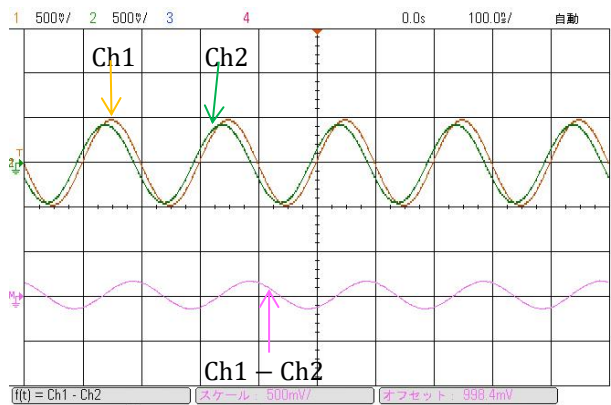


図 2.8-2-h 5MHz



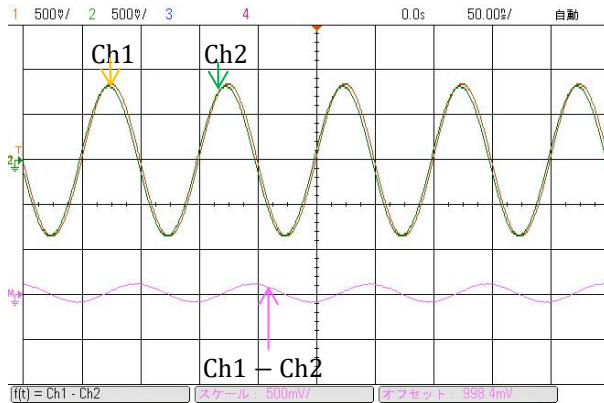


図 2.8-2-i 10MHz

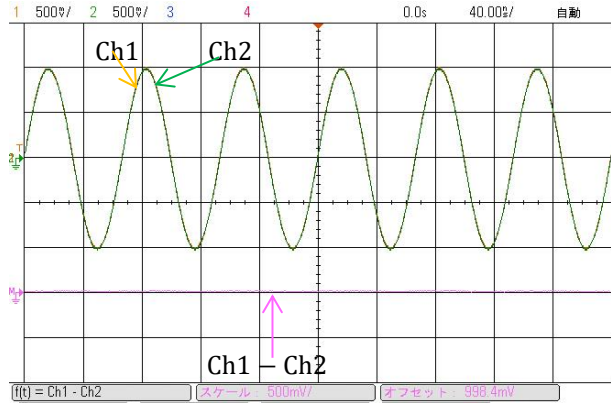


図 2.8-2-j 15MHz

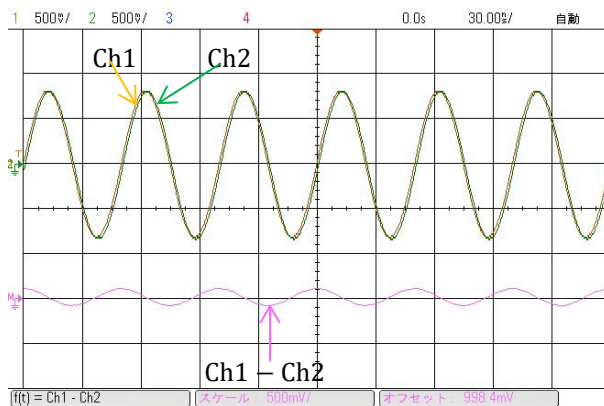


図 2.8-2-k 20MHz

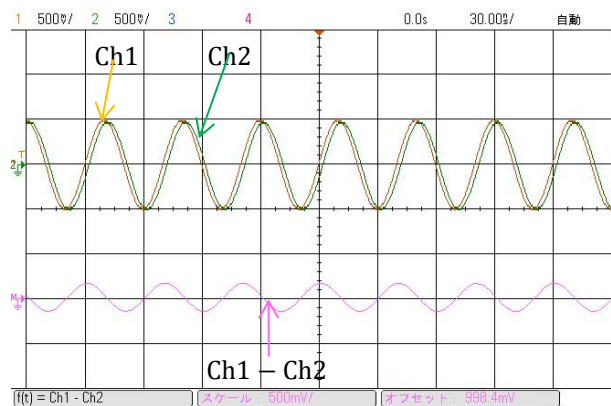


図 2.8-2-l 25MHz

## (2) ケーブル長 7.2m 【参考データ】

### ・終端開放

次ページに示す図 2.8-2-m の周波数掃引特性を見ると約 6.4MHz と約 19.3MHz の 2 つの周波数で共振点が観測されます。

1 番目の共振点(周波数：6.4MHz)の前後 2 点の周波数(合計 5 点)で入力電圧 $v_i(t)$ 、入力電流 $i_i(t)$ (10Ω の抵抗の両端電圧で測定)、出力電圧 $v_l(t)$ を測定した結果を図 2.8-2-n1～2.8-2-r1 に示します。

また、2 番目の 1 番目の共振点(周波数：19.3MHz)の前後 2 点の周波数(合計 5 点)で入力電圧 $v_i(t)$ 、入力電流 $i_i(t)$ 、出力電圧 $v_l(t)$ を測定した結果を図 2.8-2-n2～2.8-2-r2 に示します。

いずれの場合も中心点の前後で、入力電圧と入力電流の位相関係が反転しており、同じ性質を繰り返していることが分かります。

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_i(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$$

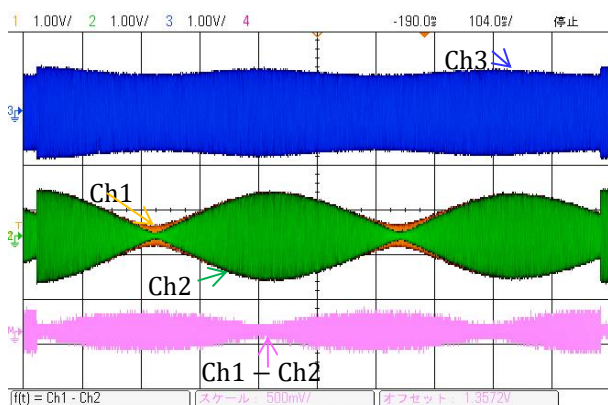


図 2.8-2-m 7.2m 周波数掃引特性

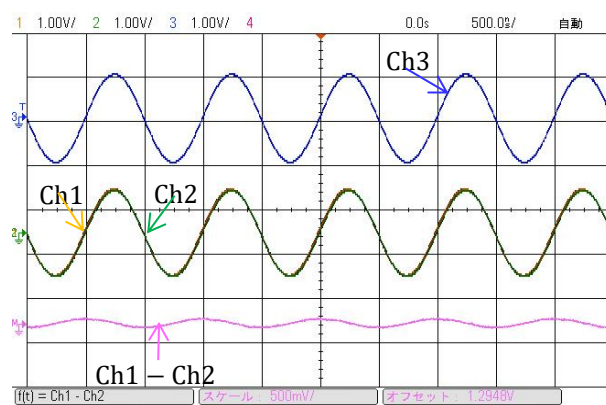


図 2.8-2-n1 1MHz

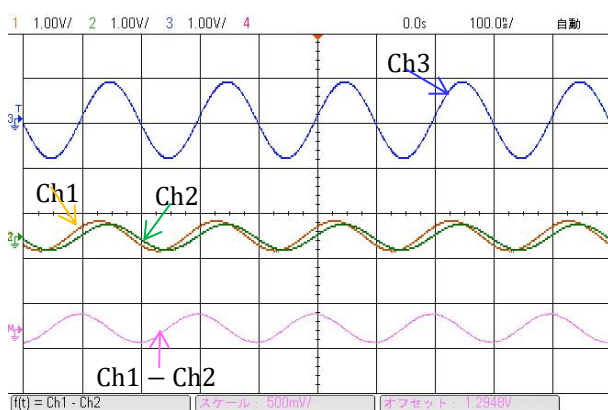


図 2.8-2-o1 5MHz

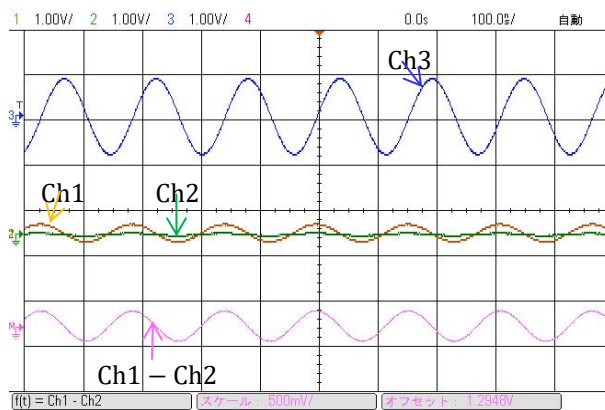


図 2.8-2-p1 6.4MHz (第 1 共振周波数)

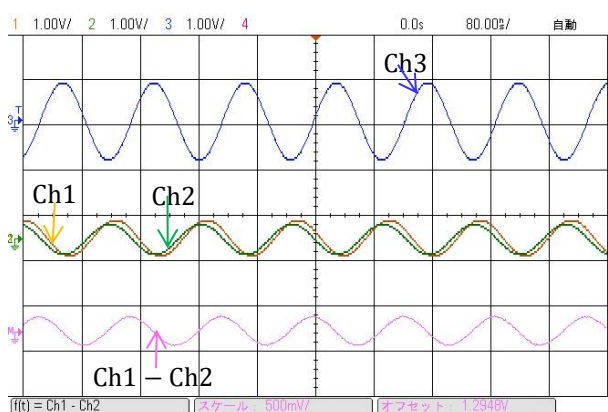


図 2.8-2-q1 8MHz

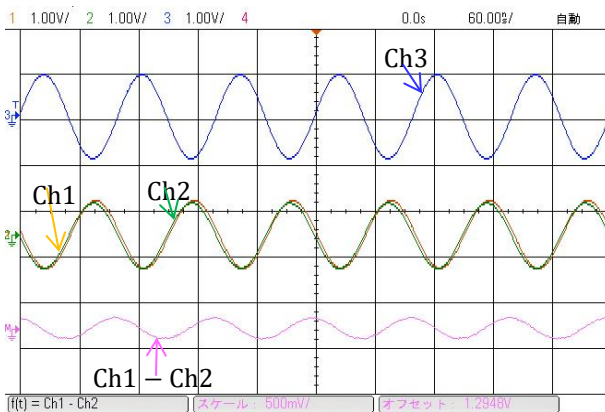


図 2.8-2-r1 10MHz

次に第 2 共振周波数を中心とする前後 4 点での特性を示します。

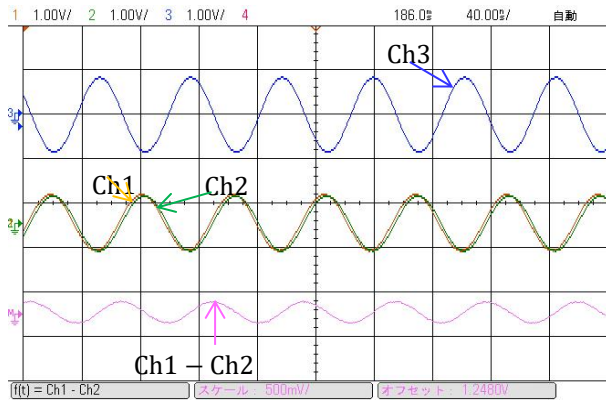


図 2.8-2-n2 16MHz

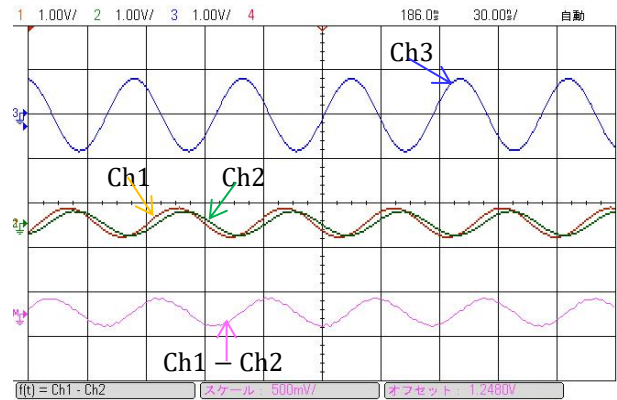


図 2.8-2-o2 18MHz

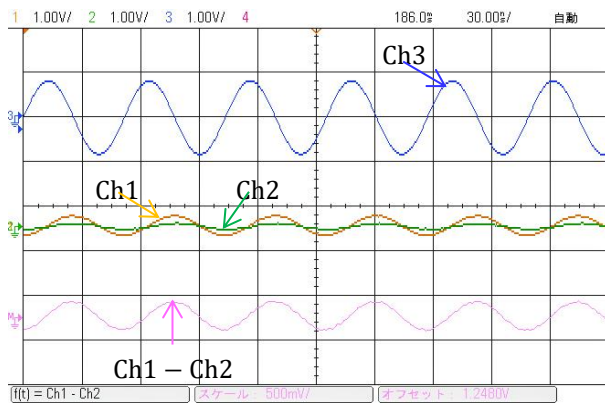


図 2.8-2-p2 19.3MHz (第 2 共振周波数)

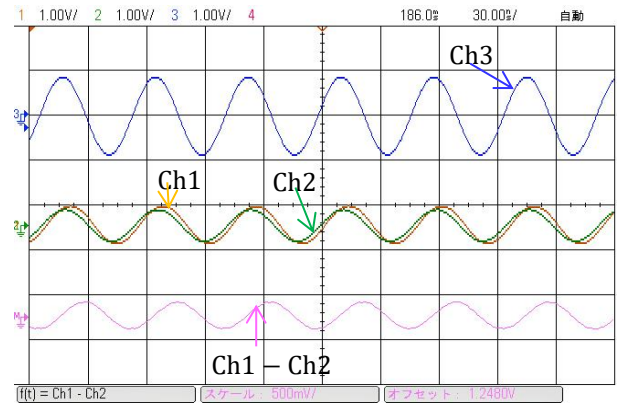


図 2.8-2-q2 21MHz

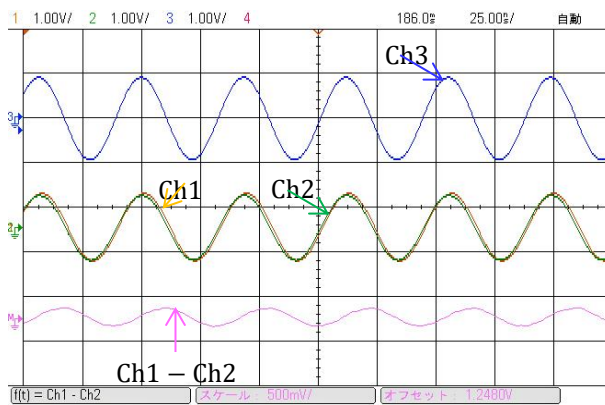


図 2.8-2-r2 23MHz

・終端短絡

$$\text{Ch1} = v_s(t), \text{Ch2} = v_i(t), \text{Ch3} = v_l(t), \text{Ch1} - \text{Ch2} = v_s(t) - v_i(t) = i_i(t) \times R$$

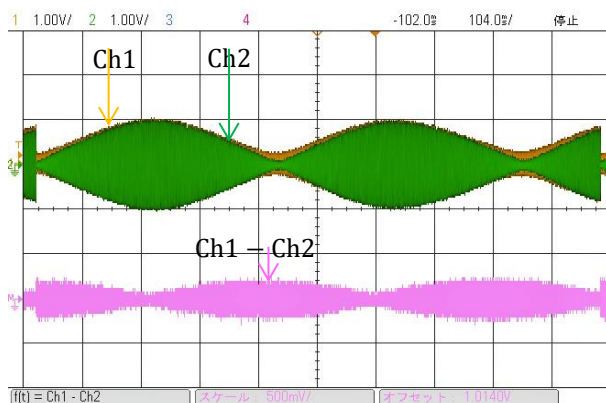


図 2.8-2-s 7.2m 周波数スイープ特性

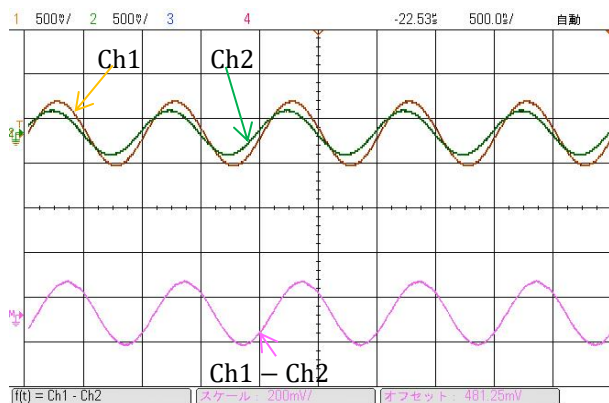


図 2.8-2-t 1MHz

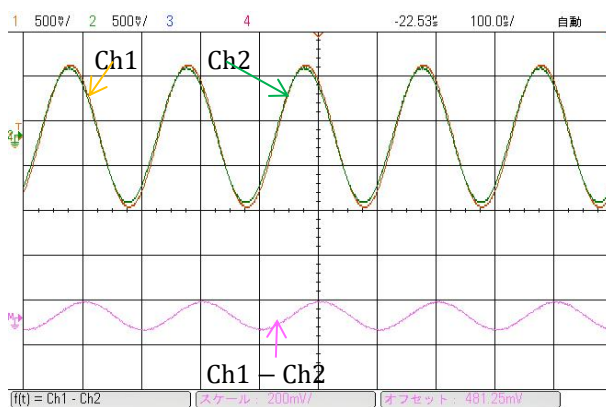


図 2.8-2-u 5MHz

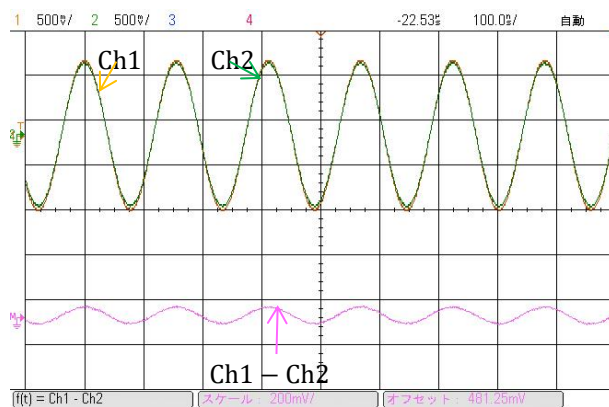


図 2.8-2-v 6.4MHz

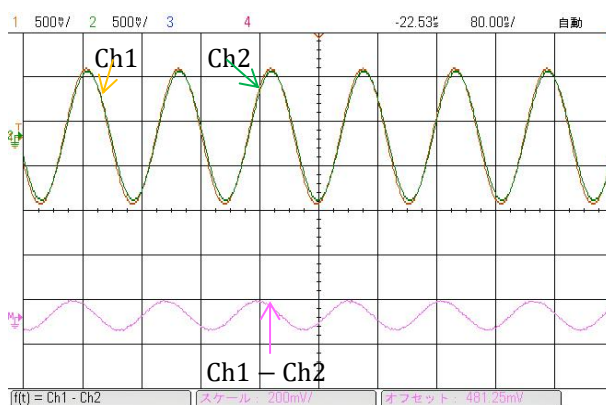


図 2.8-2-w 8MHz

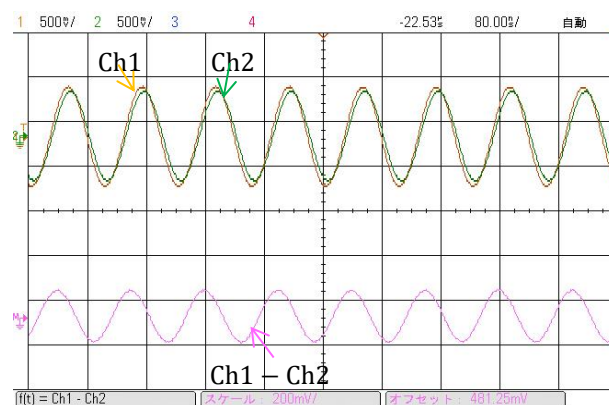


図 2.8-2-x 10MHz



## 2.9 時間領域での現象

平行 2 本線と同軸ケーブルの各々について、終端開放、終端整合、終端  $20\Omega$  抵抗の場合のパルス応答を測定します。信号源インピーダンス  $R_g$ 、線路の特性インピーダンス  $Z_0$ 、負荷抵抗  $R_l$  の大小関係によってパルス応答の波形が変化する様子を観測します。図 2.9-1 は平行 2 本線路と同軸線路を共通の模式図で示したものです。

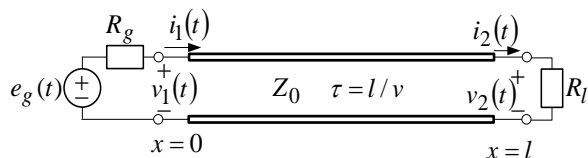
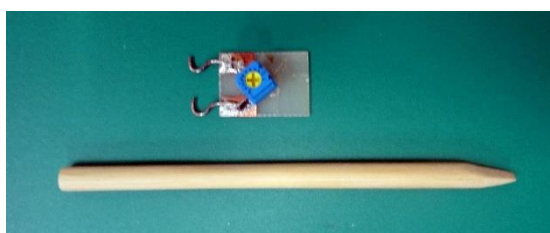


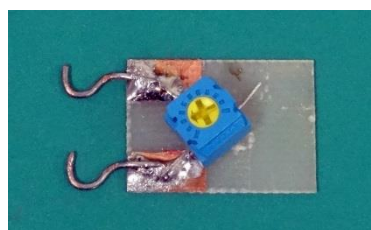
図 2.9-1 伝送線路の模式図

### ・使用部品：半固定抵抗とドライバ

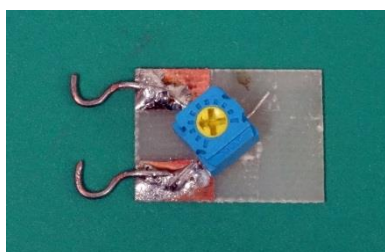
負荷抵抗  $R_l$  を可変にして、伝送線路の整合状態と不整合状態を観測するため、半固定抵抗を用います。半固定抵抗の抵抗値を変えるために竹製のドライバを用意しました。抵抗値は  $0\Omega \sim 300\Omega$  (公称) の間で可変ですが、目盛が細かい目視で抵抗値を決めることはかなり困難です。インピーダンスメータを複数台用意することができませんので、目安となる目盛を示す写真を添付します。整合状態はオシロスコープのパルス波形に反射が観測されない場合ですので、正確にはオシロスコープを見て調整してください。



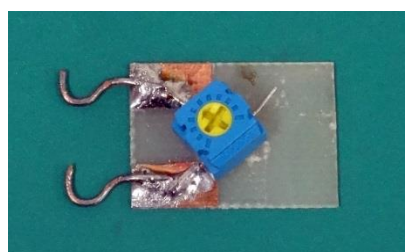
半固定抵抗とドライバ



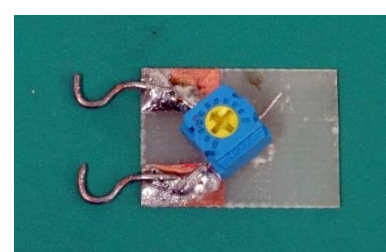
20Ω (約 2 目盛)



50Ω (約 3 目盛)



125Ω (約 4.4 目盛)



133Ω (約 4.8 目盛)

## 2.9.1 平行 2 本線路のパルス応答

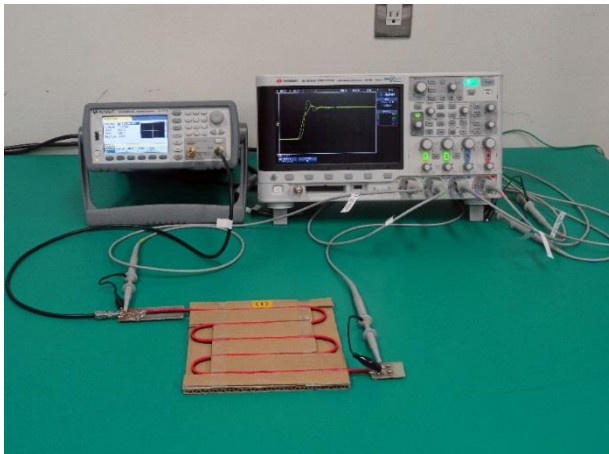
### (1) ケーブル長 1m

#### ・測定条件

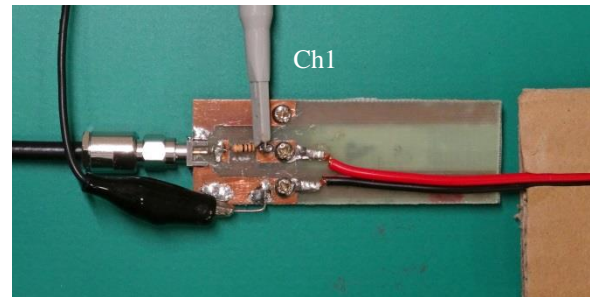
信号源インピーダンス :  $R_g = 60\Omega$

ケーブルの特性インピーダンス  $Z_0 = 125\Omega$

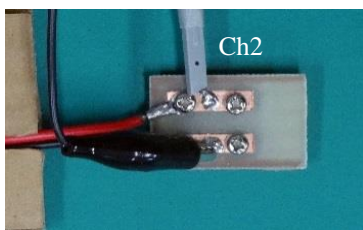
入力信号 : 波形 矩形波、繰り返し周波数 100kHz



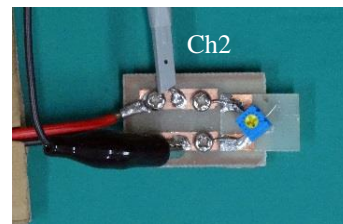
実験のセットアップ



入力部



出力部(終端開放)



出力部(半固定抵抗)

### 実験結果

$\text{Ch1} = v_1(t)$ ,  $\text{Ch2} = v_2(t)$

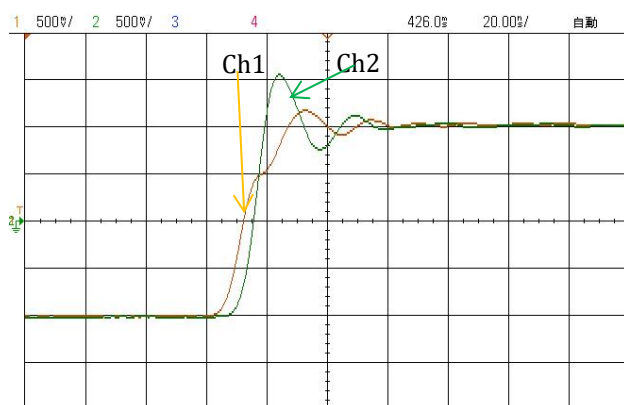


図 2.9-1-a 1m 終端開放  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

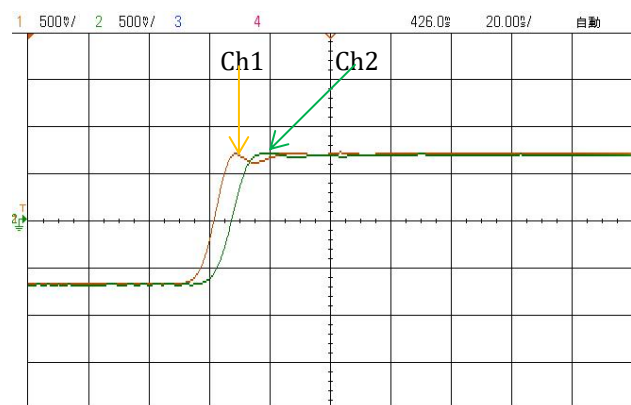


図 2.9-1-b 1m 終端整合 ( $R_l = 125\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) = 0$

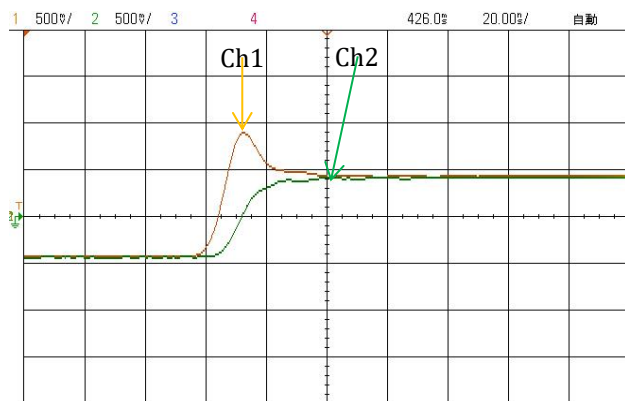


図 2.9-1-c 1m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) > 0$

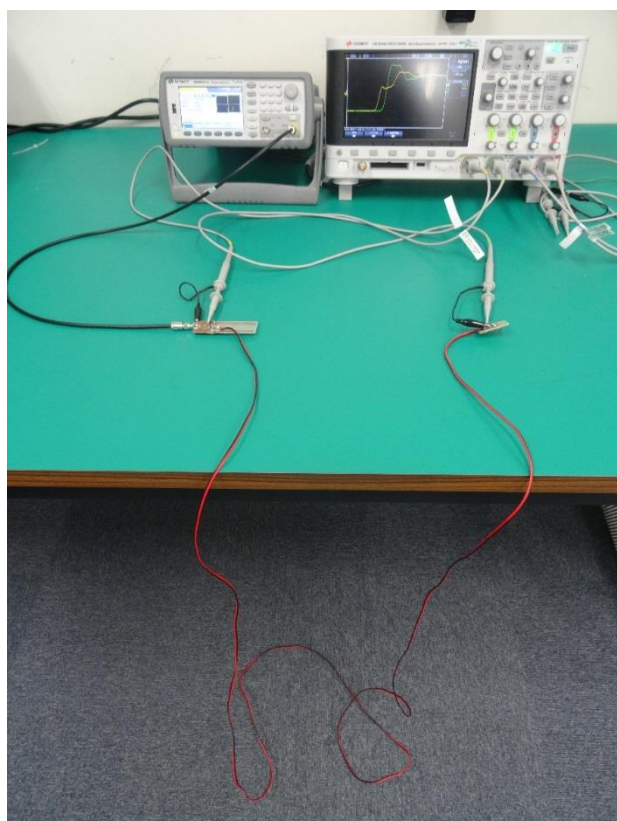
## (2) ケーブル長 3m

### ・測定条件

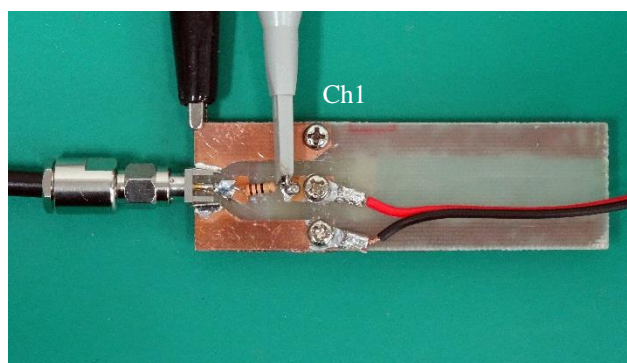
信号源インピーダンス :  $R_g = 60\Omega$

ケーブルの特性インピーダンス  $Z_0 = 133\Omega$

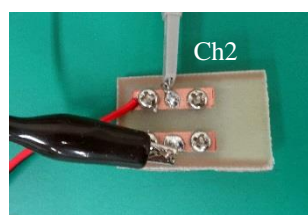
入力信号 : 波形 矩形波、繰り返し周波数 100kHz



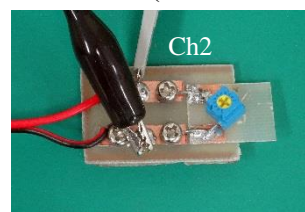
実験のセットアップ



入力部



出力部(終端開放)



出力部(半固定抵抗)

・測定条件

信号源インピーダンス :  $R_g = 60\Omega$

ケーブルの特性インピーダンス  $Z_0 = 133\Omega$

入力信号 : 波形 矩形波、繰り返し周波数 100kHz

実験結果

Ch1 =  $v_1(t)$ , Ch2 =  $v_2(t)$

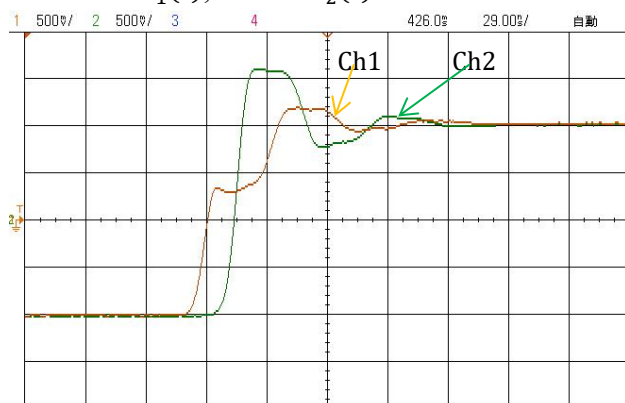


図 2.9-1-d 3m 終端開放  
( $Z_0 - R_g$ )( $Z_0 - R_l$ ) < 0

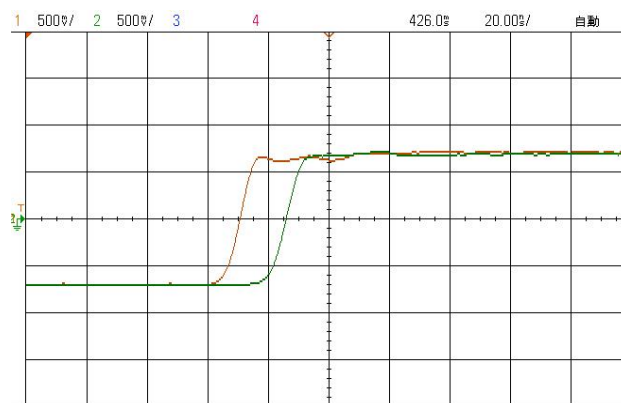


図 2.9-1-e 3m 終端整合 ( $R_l = 133\Omega$ )  
( $Z_0 - R_g$ )( $Z_0 - R_l$ ) = 0

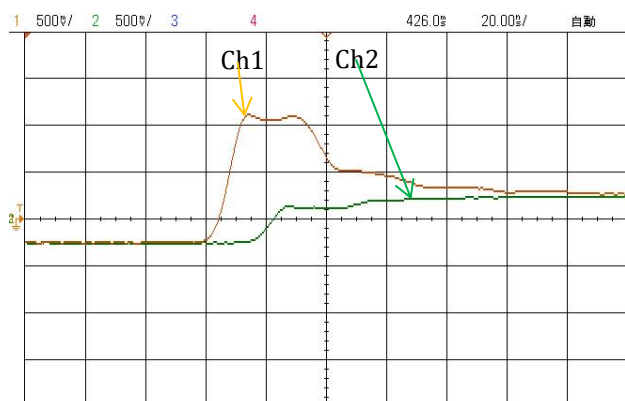


図 2.9-1-f 3m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ )  
( $Z_0 - R_g$ )( $Z_0 - R_l$ ) > 0

## 2.9.2 同軸線路のパルス応答

### (1) ケーブル長 1m

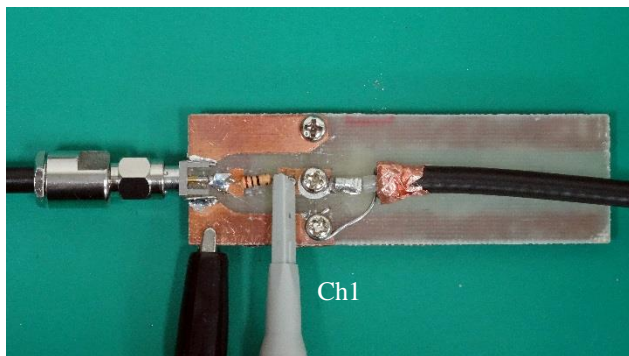
・測定条件

信号源インピーダンス :  $R_g = 60\Omega$

ケーブルの特性インピーダンス  $Z_0 = 50\Omega$

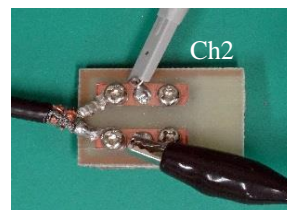
入力信号 : 波形 矩形波、繰り返し周波数 100kHz



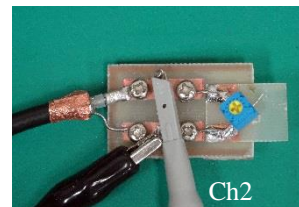


入力部

この間の長さ 1m の同軸ケーブルの表示を省略します。(ケーブル長 3m の場合を参照してください)



出力部(終端開放)



出力部(半固定抵抗)

## 実験結果

Ch1 =  $v_1(t)$ , Ch2 =  $v_2(t)$

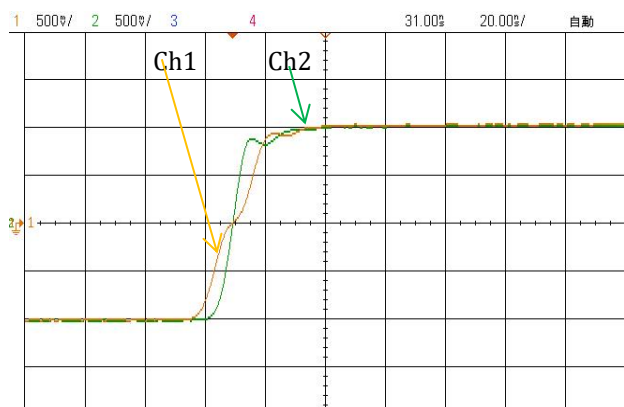


図 2.9-2-a 1m 終端開放  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) > 0$

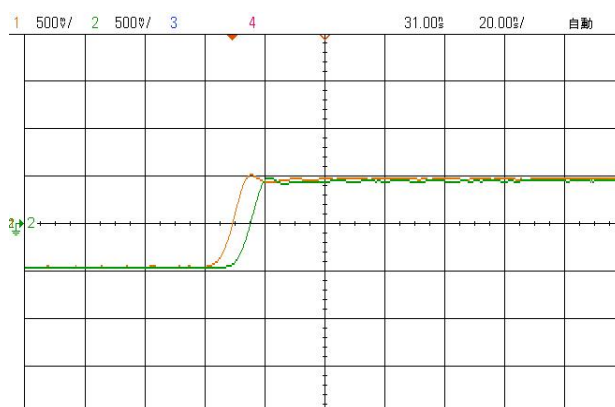


図 2.9-2-b 1m 終端整合 ( $R_l = 50\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) = 0$

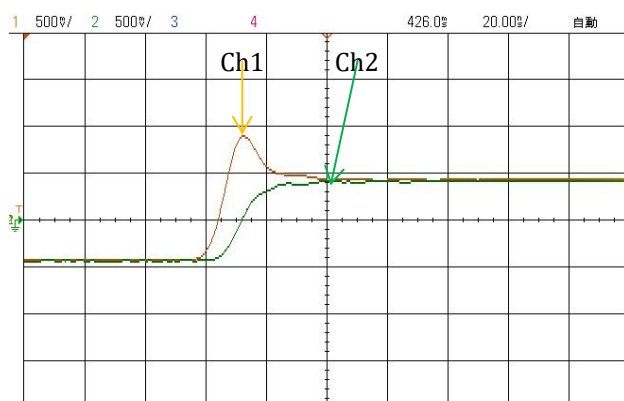


図 2.9-2-c 1m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

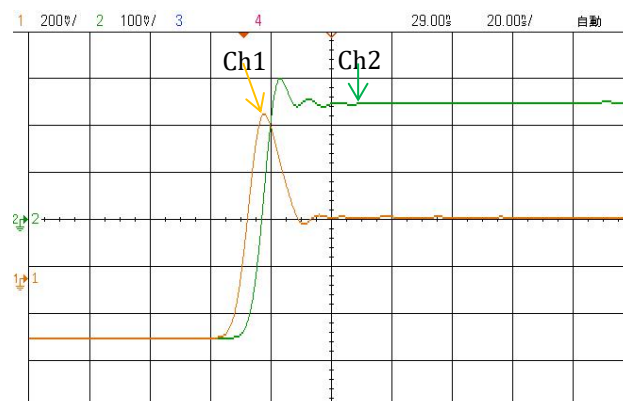


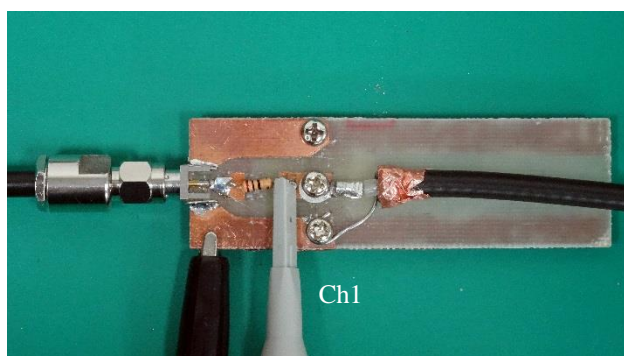
図 2.9-2-d 1m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ ) 拡大図  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

## (2) ケーブル長 3m

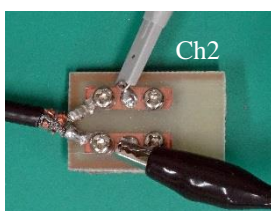
測定条件は 1m の場合と同様



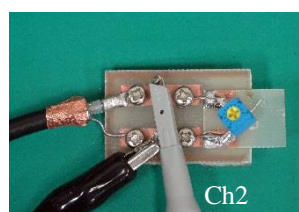
実験のセットアップ



入力部



出力部(終端開放)



出力部(半固定抵抗)

## 実験結果

Ch1 =  $v_1(t)$ , Ch2 =  $v_2(t)$

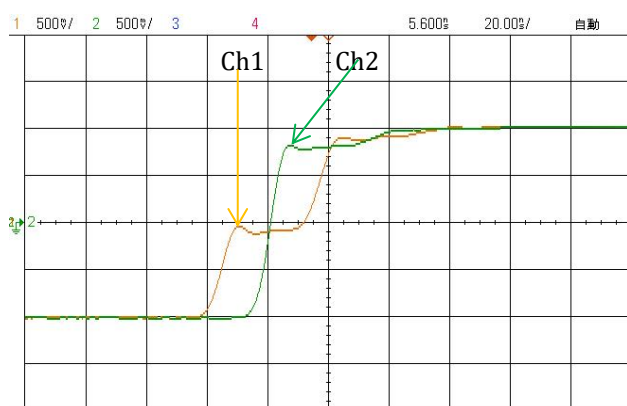


図 2.9-2-e 3m 終端開放  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) > 0$

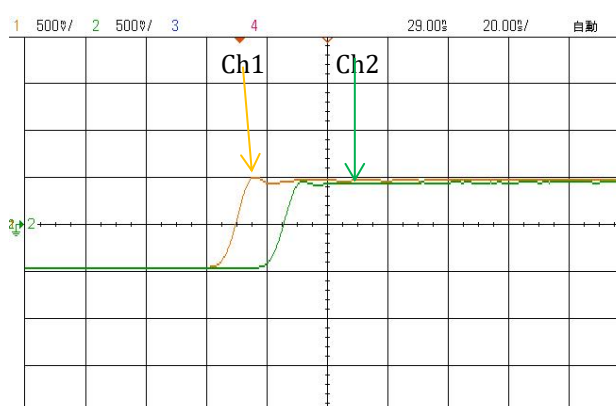


図 2.9-2-f 3m 終端整合 ( $R_l = 50\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) = 0$

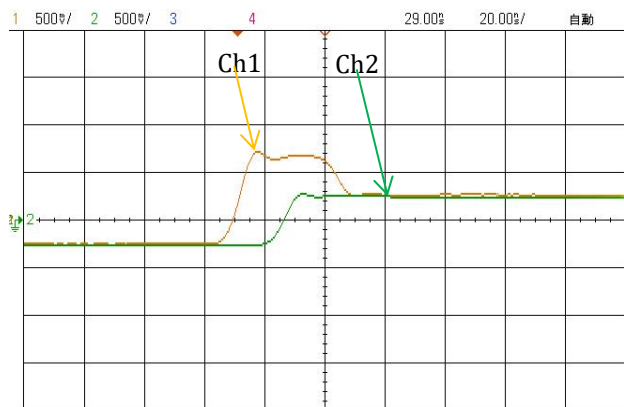


図 2.9-2-g 3m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

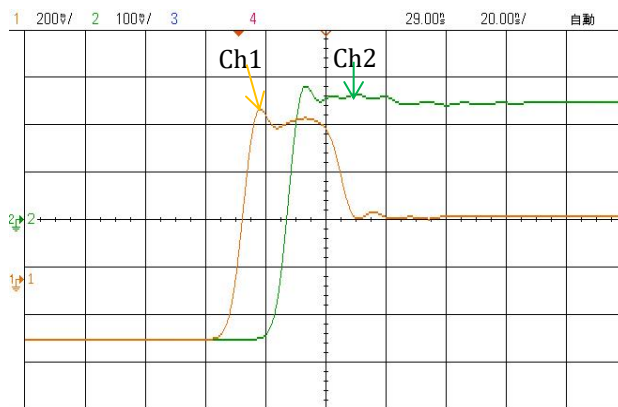


図 2.9-2-h 1m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ ) 拡大図  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

### (3) ケーブル長 7.2m 【参考データ】

実験セットアップや測定条件は 3m の場合と同様で、ケーブルのみ 7.2m の同軸ケーブルに変更します。

### 実験結果

Ch1 =  $v_1(t)$ , Ch2 =  $v_2(t)$

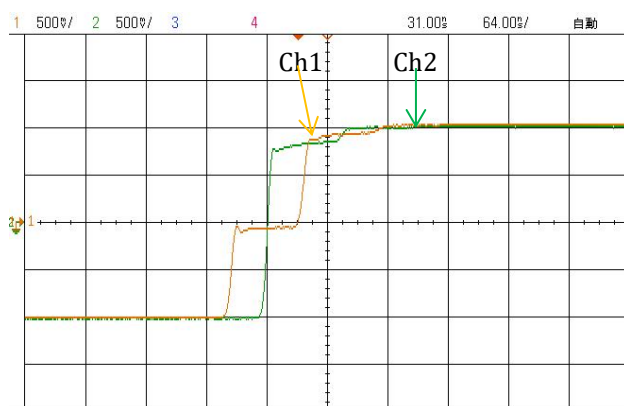


図 2.9-2-i 7.2m 終端開放  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) > 0$

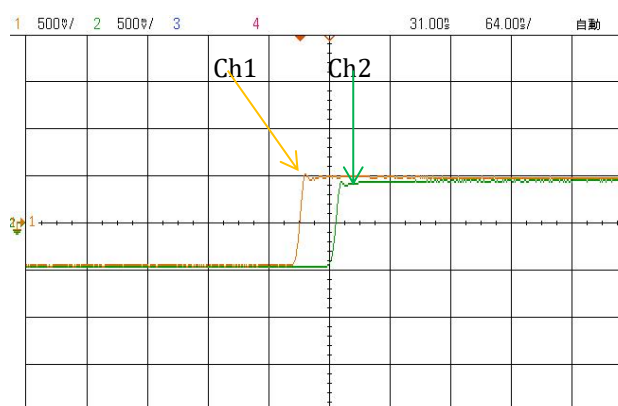


図 2.9-2-j 7.2m 終端整合 ( $R_l = 50\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) = 0$

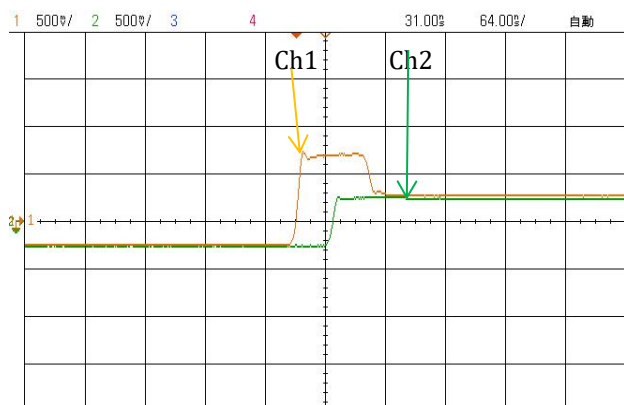


図 2.9-2-k 7.2m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ )  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

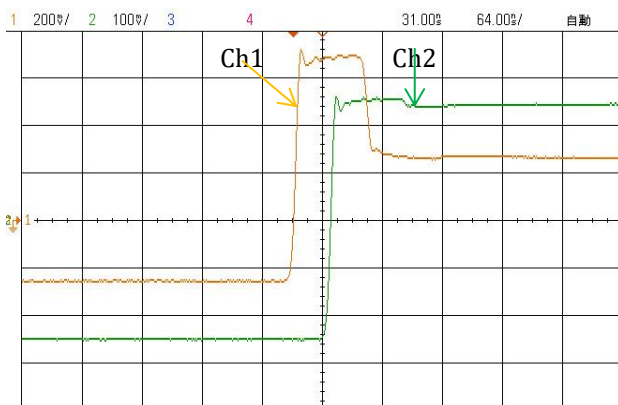


図 2.9-2-l 7.2m 終端抵抗 ( $R_l = 20\Omega$ ) 拡大図  
 $(Z_0 - R_g)(Z_0 - R_l) < 0$

## 2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか

本文では、ここまで「2.1 伝送線路は LC 素子の集合」でバランを用いた平衡駆動の場合を除いて、すべて平行 2 本線路や同軸線路のプラス側を信号発生器のプラス側に接続し、マイナス側を信号発生器のマイナス側に接続して、そのマイナス側をグラウンドに接続する線路として実験してきました。この場合、マイナス側を「グラウンド線」と呼ぶことがあります。

伝送線路に接続された信号発生器のスイッチをオンした場合、プラス側に過渡電流が流れることは言うまでもありませんが、同時にマイナス側(いわゆる「グラウンド線」)にも逆符号の電流が流れます。本節の表題「電流は常に配線を一巡して流れるのか」は、プラス側に流れ始めた電流が線路を一巡してマイナス端子に流れ込むのではないことを強調するために設けられたものです。

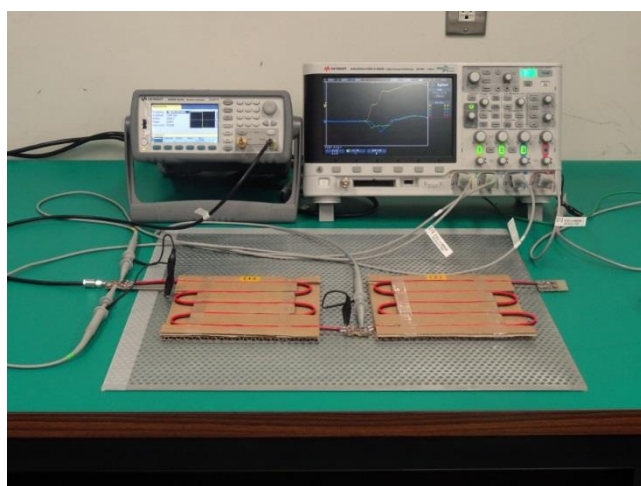
マイナス側にも電流が流れることを実験で確認するために、線路のマイナス側の中間に  $10\Omega$  の抵抗を接続し、その端子電圧を測定して等価的に電流の流れを観測します。後述する検証例(その 2)では、線路のプラス側の中間にも  $10\Omega$  の抵抗を接続しました。この状態でオシロスコープのグラウンドを入力側のマイナス端子と終端側のマイナス端子に接続すると、両端が同電位(ゼロ電位)となり、中間点の電圧を測定できません。そこで、マイナス側を浮かせた状態(floating)で測定します。そのため、伝送線路系全体のグラウンドをとるためにアルミ板を用います。

アルミ板の上に構成した伝送線路の各部の電圧を測定する場合、オシロスコープのプロブ先端を測定部分に接続し、グラウンドはアルミ板にミノムシクリップで固定します。このように構成した伝送線路において入力側に信号供給用治具 A (バランなし)を用いた場合を**不平衡駆動**、信号供給用治具 B (バラン付)を用いた場合を**平衡駆動**と呼ぶことにします。

### 2.10.1 平行 2 本線路を流れる電流の検証例 (その 1)(その 2)

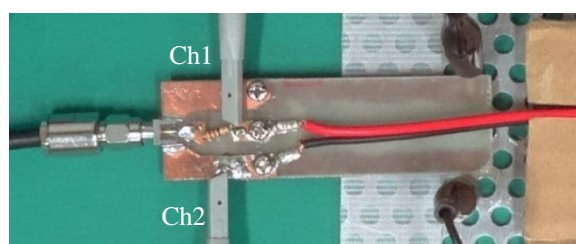
この実験では、マイナス側にのみ  $10\Omega$  の抵抗を接続した場合を検証します。オシロスコープのグラウンドをアルミ板に接続し、線路のマイナス側は浮いている(floating)状態で実験します。

#### (1) 不平衡駆動-(a) 検証例(その 1)

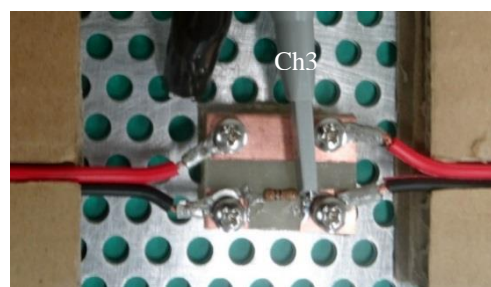


実験のセットアップ

(入力信号：波形 矩形波、繰り返し周波数 100kHz)

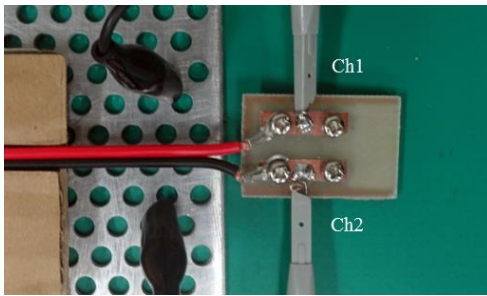


入力部

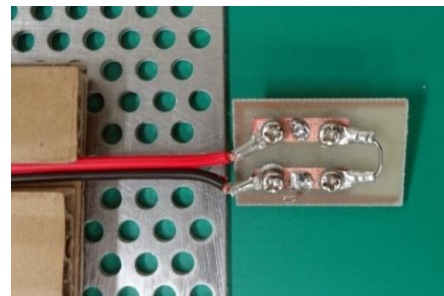


中間接続部 A





出力部(終端開放)



出力部(終端短絡)

### ・終端開放

終端開放の場合、測定ポイントが 5 点になりますが、オシロスコープのプロブは 4 チャンネルまでしかありませんので、入力側のデータとして入力部と中間接続部を、出力側として中間接続部と出力部を左右に並べて表示しました。したがって、出力側の電圧はCh1とCh2のプロブで測定しています。

Ch1 =  $v_{ip}(t)$ , Ch2 =  $v_{im}(t)$ , Ch3 =  $v_{mm}(t)$

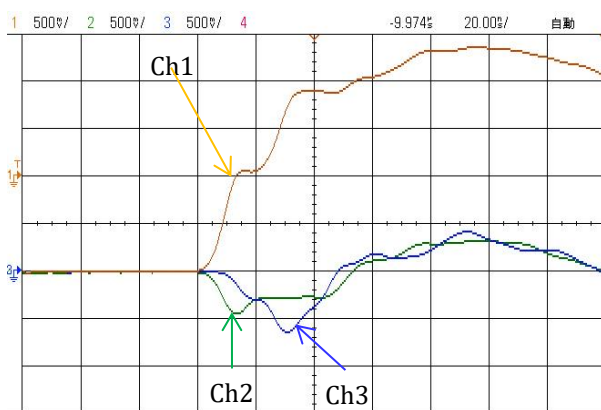


図 2.10-1-a 不平衡駆動 終端開放 (入力側)

Ch3 =  $v_{mm}(t)$ , Ch1 =  $v_{lp}(t)$ , Ch2 =  $v_{lm}(t)$

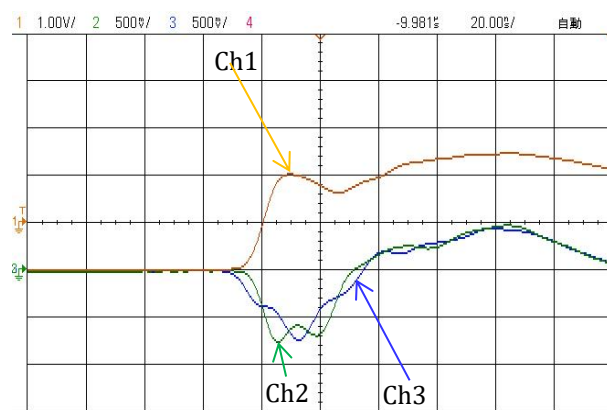


図 2.10-1-b 不平衡駆動 終端開放 (出力側)

### ・終端短絡

Ch1 =  $v_{ip}(t)$ , Ch2 =  $v_{im}(t)$ , Ch3 =  $v_{mm}(t)$

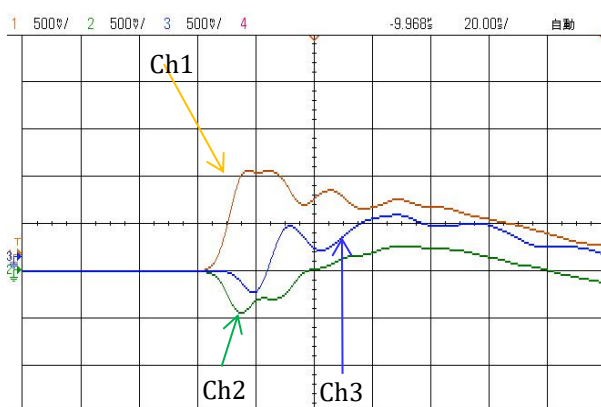
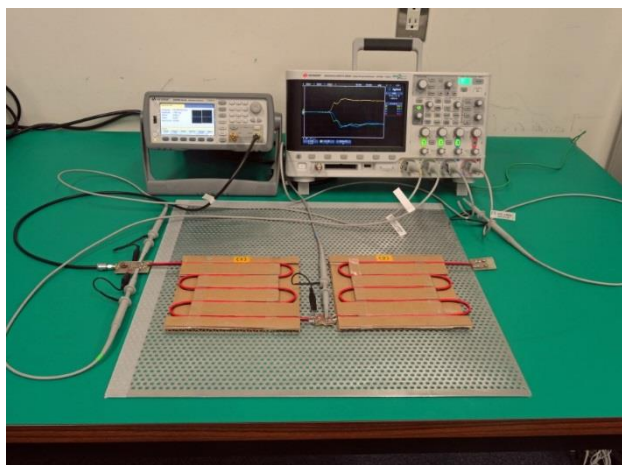
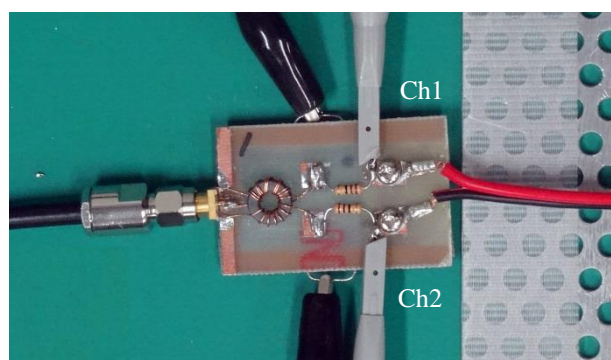


図 2.10-1-c 不平衡駆動 終端短絡

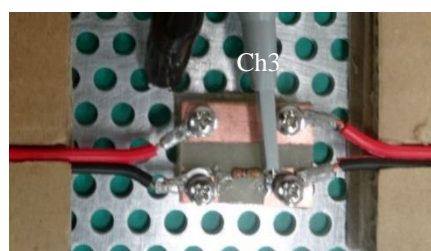
## (2) 平衡駆動-(a) 検証例(その 2)



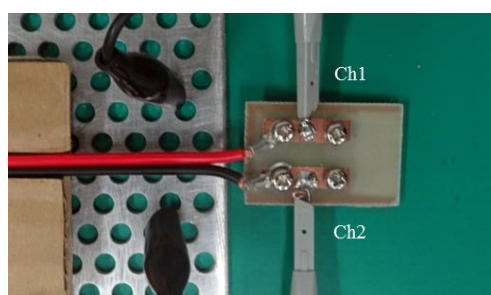
実験のセットアップ



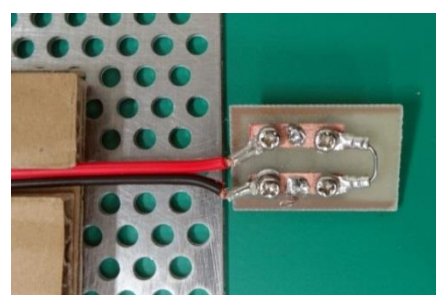
入力部



中間接続部 A



出力部(終端開放)



出力部(終端短絡)

### ・終端開放

不平衡駆動(a)の場合と同様に、入力側と出力側のデータを左右に並べて表示しました。

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \text{Ch3} = v_{mm}(t)$$

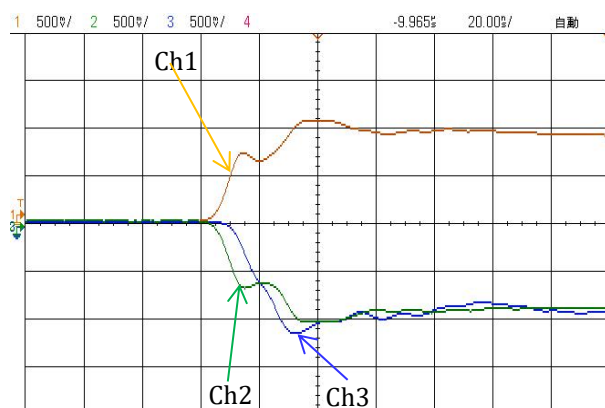


図 2.10-1-d 平衡駆動 終端開放 (入力側)

$$\text{Ch3} = v_{mm}(t), \text{Ch1} = v_{lp}(t), \text{Ch2} = v_{lm}(t)$$

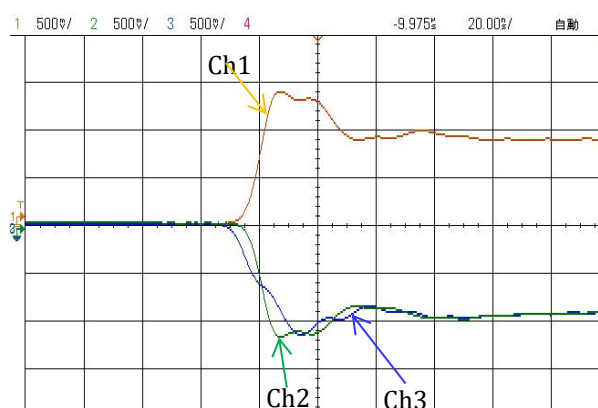


図 2.10-1-e 平衡駆動 終端開放 (出力側)

- ・ 終端短絡

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \text{Ch3} = v_{mm}(t)$$

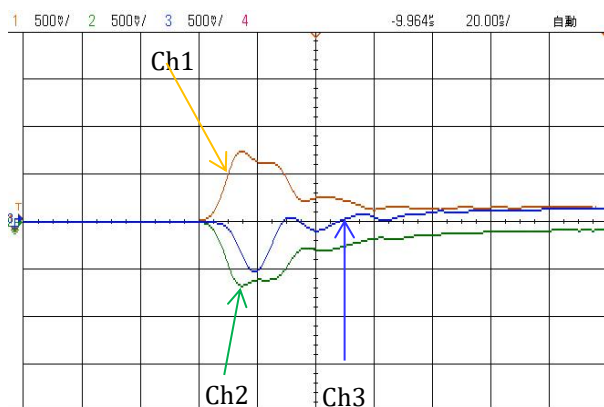


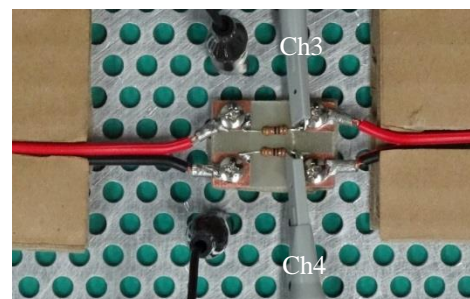
図 2.10-1-f 平衡駆動 終端短絡

## 2.10.2 平行 2 本線路を流れる電流の検証例 (その 3)(その 4)

この実験では、プラス側とマイナス側に  $10\Omega$  の抵抗を接続した場合を検証します。オシロスコープのグラウンドをアルミ板に接続し、線路のマイナス側が浮いている状態は検証例(その 1)と同様です。

### (1) 不平衡駆動-(b) 検証例(その 3)

実験のセットアップ、入力部、出力部は不平衡駆動-(a)の場合と同様で、異なるのは右の写真に示す中間接続部 B のみです。



中間接続部 B

## ・ 終端開放

不平衡駆動(a)の場合と同様に、入力側と出力側のデータを左右に並べて表示しました。

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t),$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t)$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t),$$

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t)$$

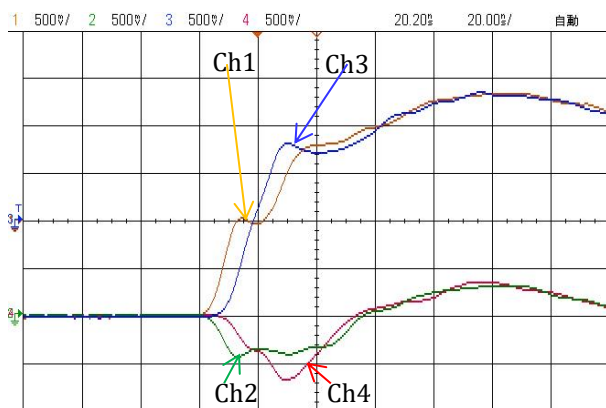


図 2.10-2-a 不平衡駆動 終端開放 (入力側)

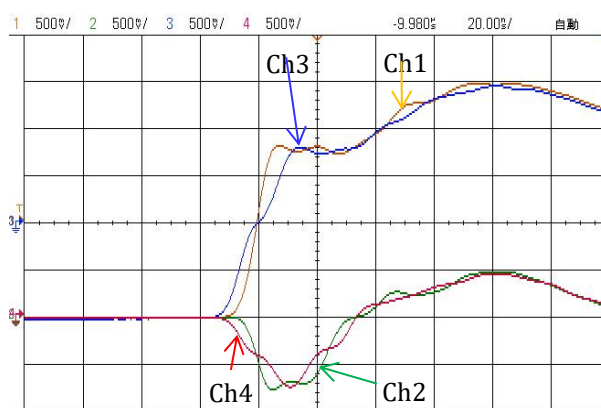


図 2.10-2-b 不平衡駆動 終端開放 (出力側)

## ・ 終端短絡

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t),$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t)$$

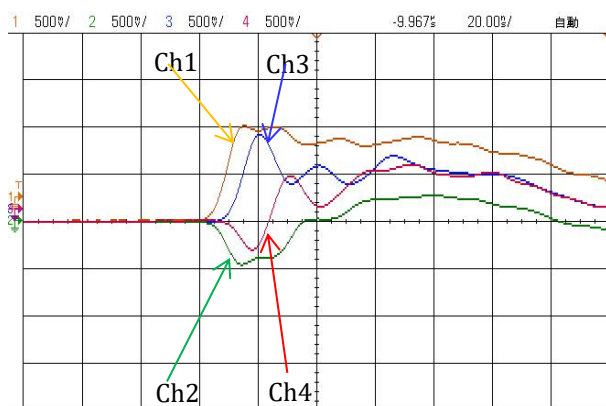
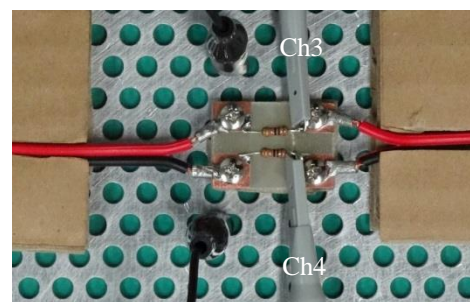


図 2.10-2-c 不平衡駆動 終端短絡

## (2) 平衡駆動-(b) 検証例(その 4)

実験のセットアップ、入力部、出力部は不平衡駆動-(a)の場合と同様で、異なるのは右の写真に示す中間接続部 B のみです。



中間接続部 B



## ・ 終端開放

平衡駆動(a)の場合と同様に、入力側と出力側のデータを左右に並べて表示しました。

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t),$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t)$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t),$$

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t)$$

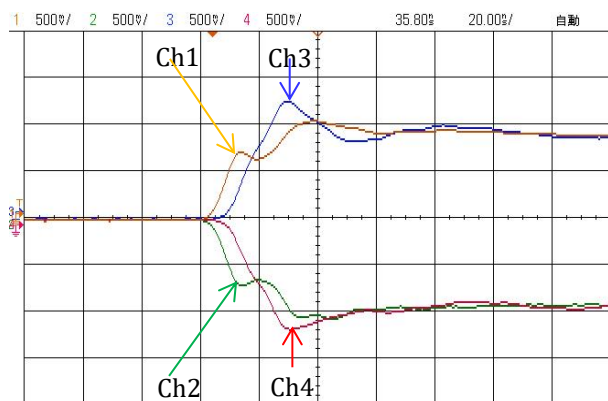


図 2.10-2-d 平衡駆動 終端開放 (入力側)

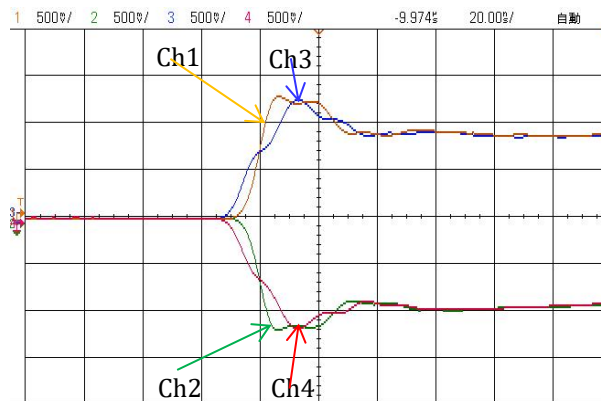


図 2.10-2-e 平衡駆動 終端開放 (出力側)

## ・ 終端短絡

$$\text{Ch1} = v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t),$$

$$\text{Ch3} = v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t)$$

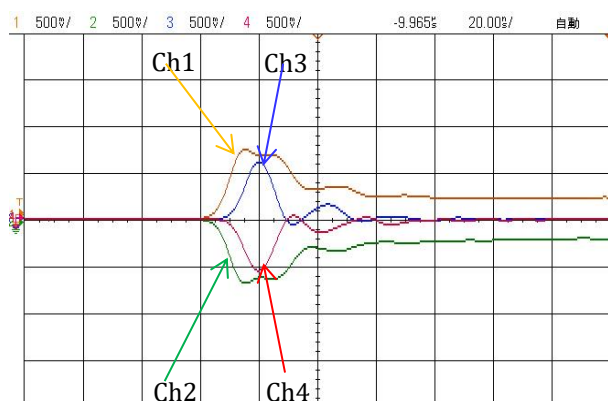


図 2.10-2-f 平衡駆動 終端短絡

## 2.10.3 グラウンドのとり方に関する追加実験 【参考データ】

これまで行った課題 1～3 や「2.10 時間領域での現象」では、プラス側を信号発生器のプラス側に接続し、マイナス側を信号発生器のマイナス側に接続し、そのマイナス側をグラウンドに接続して実験しました。マイナス側の線をいわゆる「グラウンド線」として使用したわけです。

一方、「2.1 伝送線路は LC 素子の集合」と本節「2.10 電流は常に配線を一巡して流れるのか」では、マイナス側をグラウンドに接続せずに浮いた(floating) 状態で実験しました。このようにマイナス側が浮いた状態で使用する場合、本節で実験したように不平衡駆動と平衡駆動の 2 種類の駆動方法が考えられます。

バランスを用いた平衡駆動では、図 2.1-1(b)に示したように、1 次側と 2 次側で共通のグラウンドがとられているので、オシロスコプのグラウンドを②⑤に接続しても問題なく安定した測定ができます。

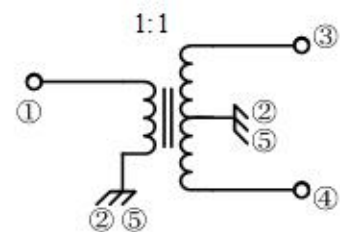


図 2.1-1(b) 等価回路

ここでは参考データとして、不平衡駆動-(b)の平行 2 本線とグラウンド間の距離によって信号波形が受ける影響について測定した結果を示します。

- (1) 不平衡駆動ではプラス側とマイナス側の波形が非対称になっています。また、グラウンドから浮いているためにノイズの誘導を受けやすくなっています。この不平衡線路を差動線路と考えて、プラス側とマイナス側の差分をとると、同相ノイズが除去され安定した波形が得られることを確認する実験を行いました。

$$\begin{aligned} \text{Ch1} &= v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t), \\ \text{Ch3} &= v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t) \end{aligned}$$

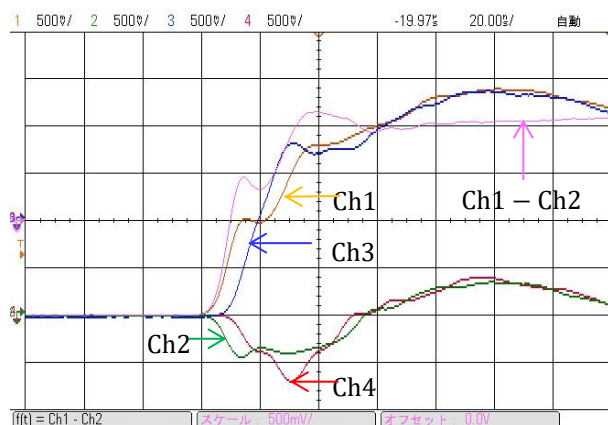


図 2.10-3-a

図 2.10-2-a の不平衡駆動（終端開放）における入力側。線路はアルミ板の上に設置し、アルミ板にグラウンドをとる

$$\begin{aligned} \text{Ch3} &= v_{mp}(t), \text{Ch4} = v_{mm}(t), \\ \text{Ch1} &= v_{ip}(t), \text{Ch2} = v_{im}(t) \end{aligned}$$

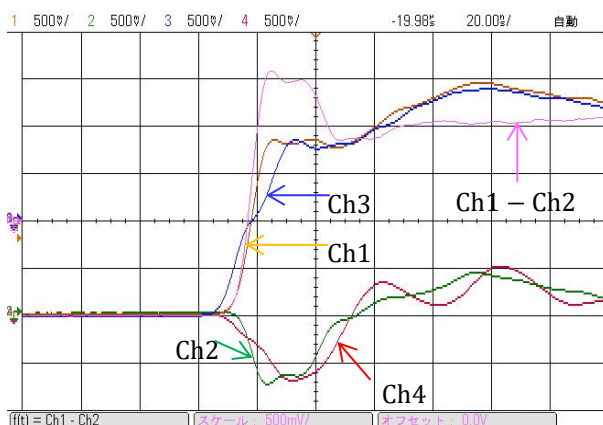


図 2.10-3-b

図 2.10-2-a の不平衡駆動（終端開放）における出力側。線路はアルミ板の上に設置し、アルミ板にグラウンドをとる

図 2.10-3-a の入力の Ch1：プラス側と Ch2：マイナス側は非対称であり、また(山の形にふくらんだ)同相ノイズが乗っています。しかし、差分をとった信号(Ch1 - Ch2)からは同相ノイズが除去されており、先に示した「2.9-1 平行 2 本線路のパルス応答」の図 2.9-1-a の入力信号に近い形になっています。

図 2.10-3-b の出力側でも同様に差分信号(Ch1 - Ch2)から同相ノイズが除去されているのが分かり、差動駆動の利点を確認できます。

(2) 次に、参考のためアルミ板にグラウンドをとった状態で(ボール紙の箱を台にして)線路を 8cm 浮かせ(グラウンドから距離をとって)、同様の測定を行いました。

その結果を図 2.10-3-c と図 2.10-3-d に示します。パルスの立ち上がり部分に大きな変化は認められませんが、同相ノイズの周期が変化する点などにグラウンドの影響を見ることができます。図 2.10-3-c と図 2.10-3-d の時間軸を 50nsec/section にしたグラフを図 2.10-3-e と図 2.10-3-f に示します。

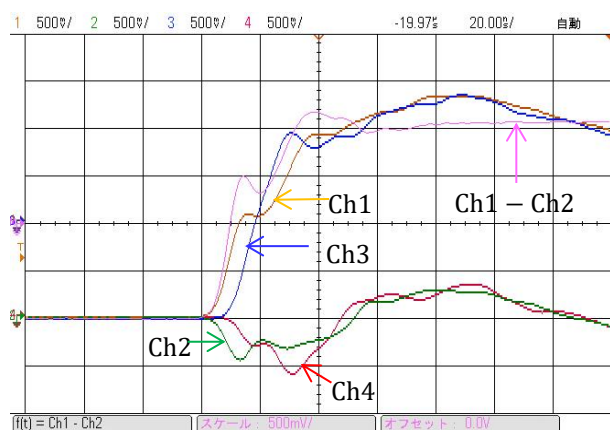


図 2.10-3-c

図 2.10-2-a の不平衡駆動 (終端開放) における入力側。線路はアルミ板にグラウンドをとり、アルミ板から 8cm 浮かせた

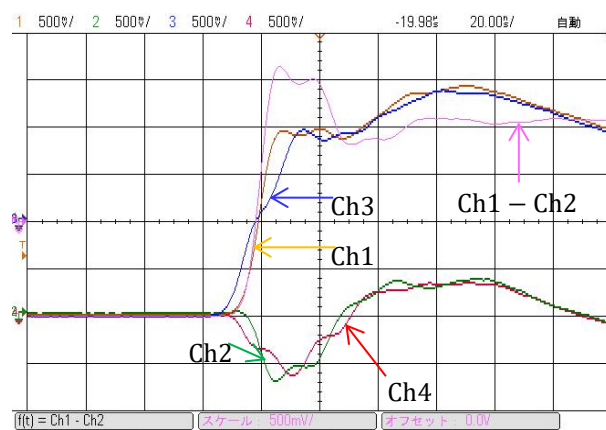


図 2.10-3-d

図 2.10-2-a の不平衡駆動 (終端開放) における出力側。線路はアルミ板にグラウンドをとり、アルミ板から 8cm 浮かせた

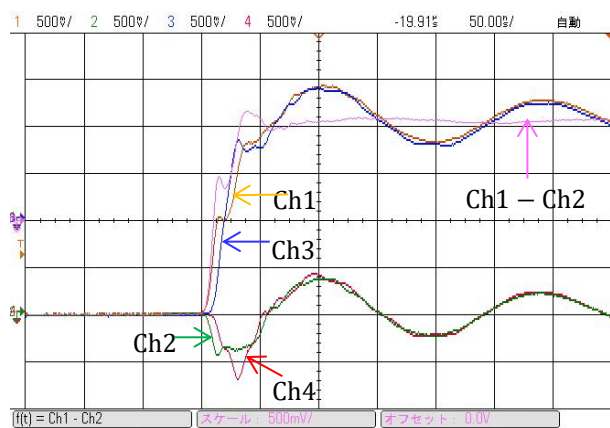


図 2.10-3-e

図 2.10-3-c の時間軸を 50nsec/section とした

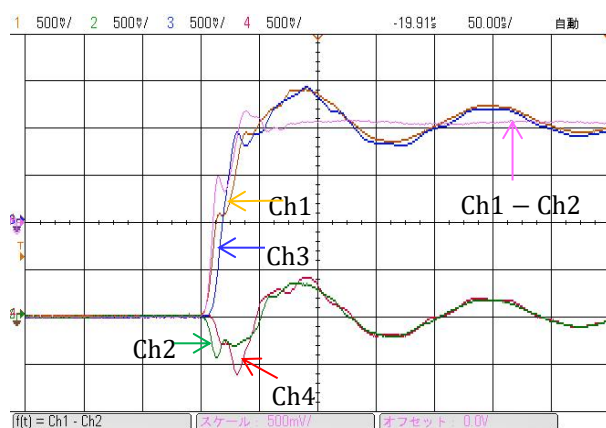


図 2.10-3-f

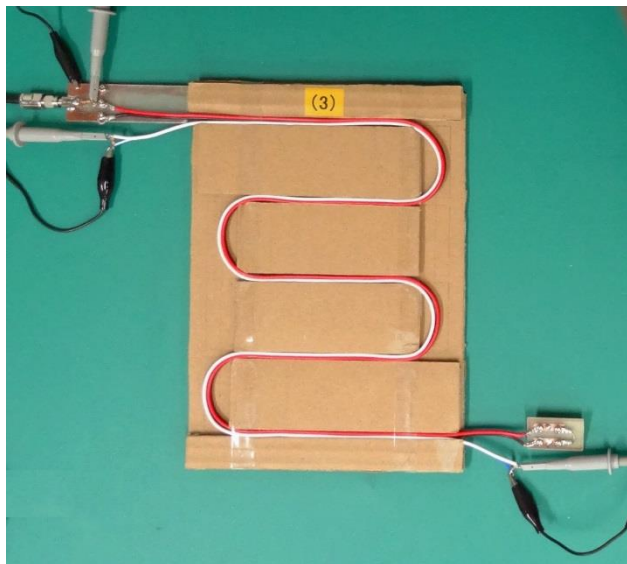
図 2.10-3-d の時間軸を 50nsec/section とした

### 3. クロストーク現象の基礎実験

#### 3.1 低周波での磁界結合

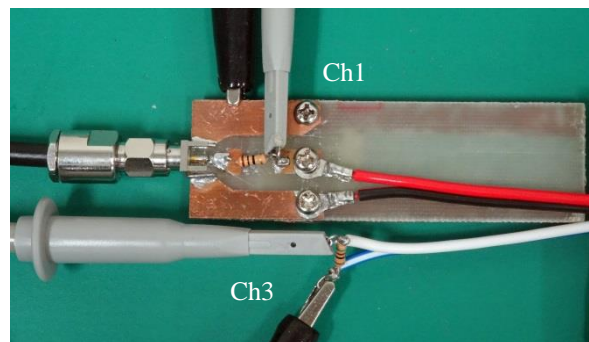
##### 課題5 終端短絡

2組の線路が束になっています。線路長(1m)が波長に比べて短い低周波領域では、電源を接続した1組の線路の終端を短絡したとき、もう一組の線路系の両端子に接続した抵抗素子の端子電圧(近端結合と遠端結合)を観測すると、位相が逆になっていることを確認します。

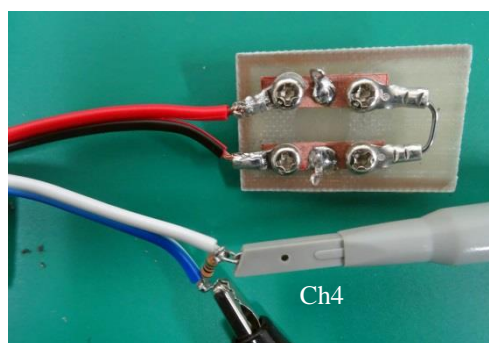


線路のセットアップ

上の写真が線路のセットアップ状態を示します。  
右上と右下の写真は、それぞれ入力側と出力側を拡大したものです。



入力部 (Ch3 で近端結合を測定)



出力部 (Ch4 で遠端結合を測定)

正弦波入力の変数を変化させて、近端クロストークと遠端クロストークの様子を観測します。

#### 実験結果

Ch1 : 入力  $v_i(t)$  Ch3 : 近端クロストーク  $v_n(t)$  Ch4 : 遠端クロストーク  $v_f(t)$

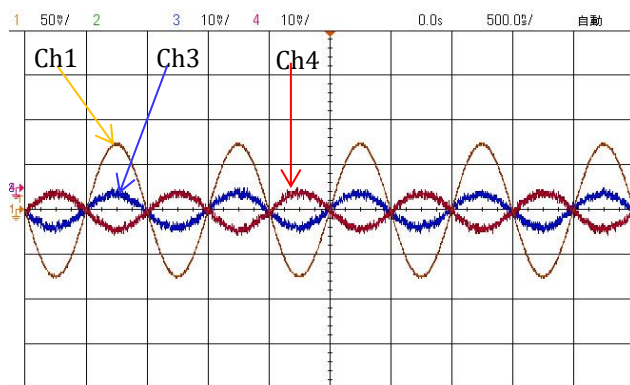


図 3.1-a 1MHz

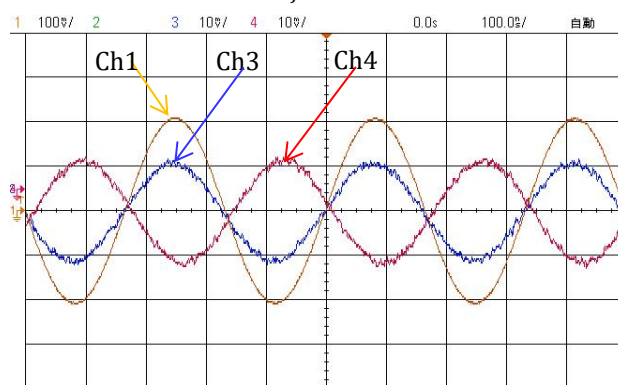


図 3.1-b 3MHz



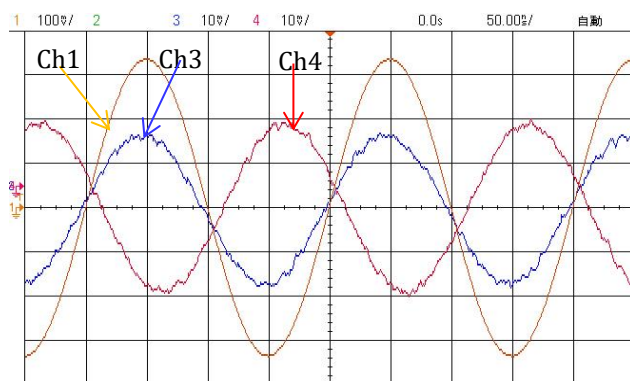


図 3.1-c 5MHz

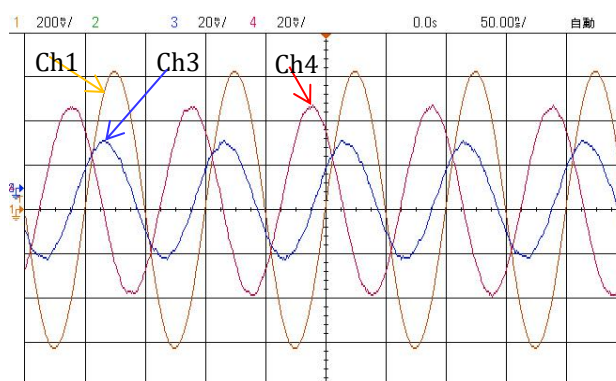


図 3.1-d 10MHz

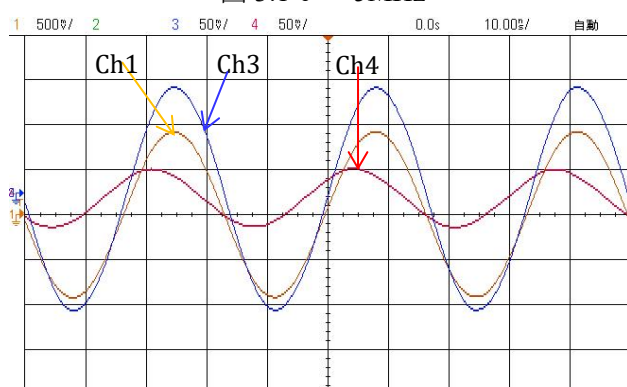


図 3.1-e 30MHz

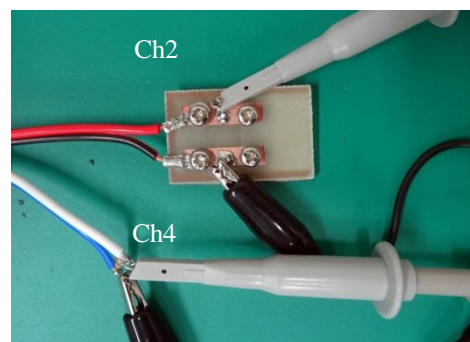
低周波領域(1MHz)では、近端クロストークと遠端クロストークの振幅は等しく位相は逆相になっていることが確認できます。また周波数が高くなるにつれて振幅と位相がずれて、10MHz と 30MHz では近端クロストークと遠端クロストークの大きさの関係が逆になっていることがわかります。

## 3.2 低周波での電界結合

### 課題 6 終端開放

2 組の線路が束になっています。線路長(1m)が波長に比べて短い低周波領域では、電源を接続した 1 組の線路の終端を開放したとき、もう一組の線路系の両端子に接続した抵抗素子の端子電圧(近端結合と遠端結合)を観測し、位相が同じになっていることを確認します。

なお、線路のセットアップと入力部は課題 5 の場合と同様ですので、出力部の写真のみ示します。



出力部 (Ch4 で遠端結合を測定)

## 実験結果

Ch1 : 入力  $v_i(t)$  Ch2 : 出力  $v_{open}(t)$  Ch3 : 近端クロストーク  $v_n(t)$  Ch4 : 遠端クロストーク  $v_f(t)$

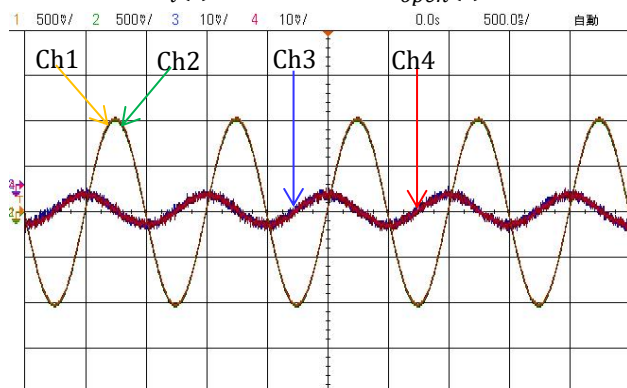


図 3.2-a 1MHz

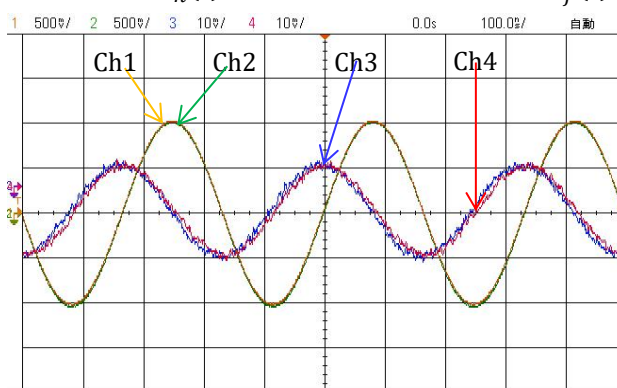


図 3.2-b 3MHz

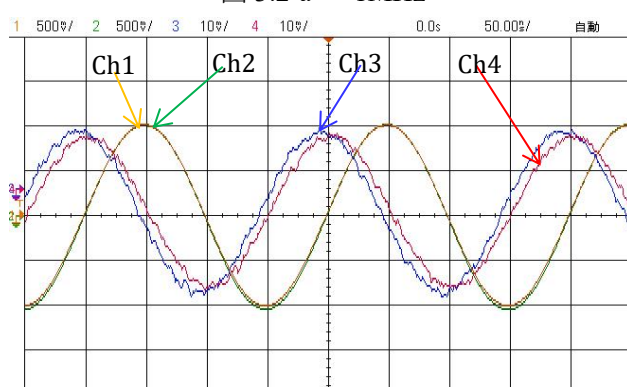


図 3.2-c 5MHz

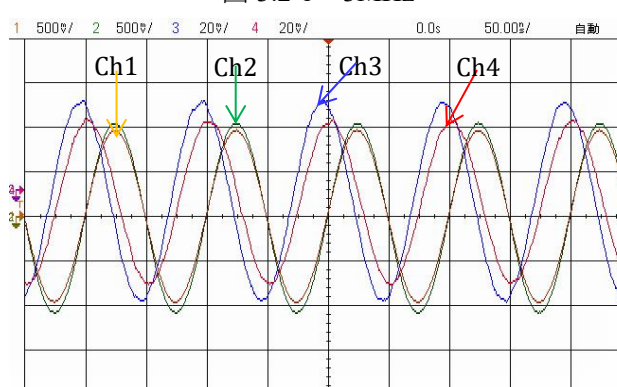


図 3.2-d 10MHz

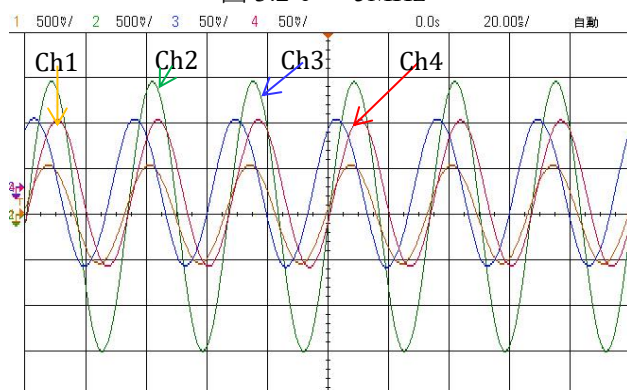
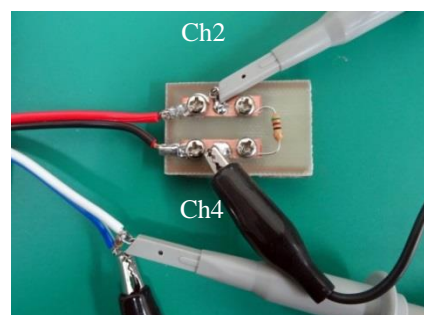


図 3.2-e 30MHz

## 3.3 高周波でのクロストーク現象

一般の線路系では電界結合と磁界結合と合わさった効果としての現象が観測されます。ここでは、終端抵抗が  $50\Omega$  の場合の近端クロストークと遠端クロストークの様子を観測します。線路のセットアップと入力部は課題 5 や課題 6 の場合と同様ですので、出力部の写真のみ示します。出力部は  $50\Omega$  の抵抗で終端されています。



出力部 (Ch4 で遠端結合を測定)

## 実験結果

Ch1 : 入力  $v_1(t)$  Ch2 : 出力  $v_3(t)$  Ch3 : 近端クロストーク  $v_n(t)$  Ch4 : 遠端クロストーク  $v_f(t)$

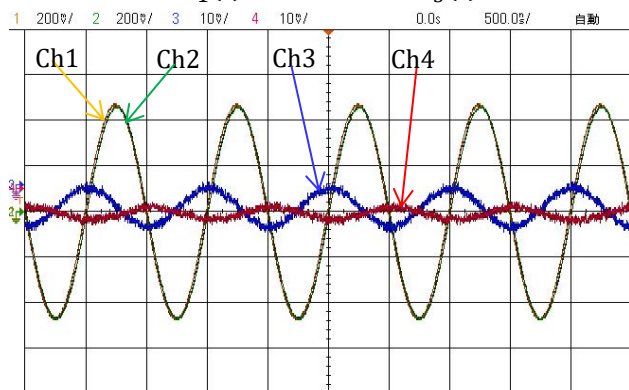


図 3.3-a 1MHz

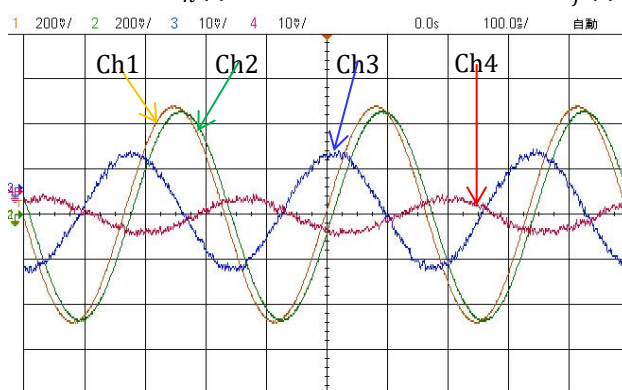


図 3.3-b 3MHz

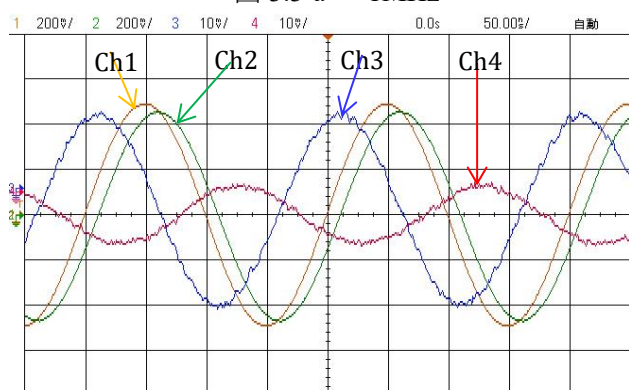


図 3.3-c 5MHz

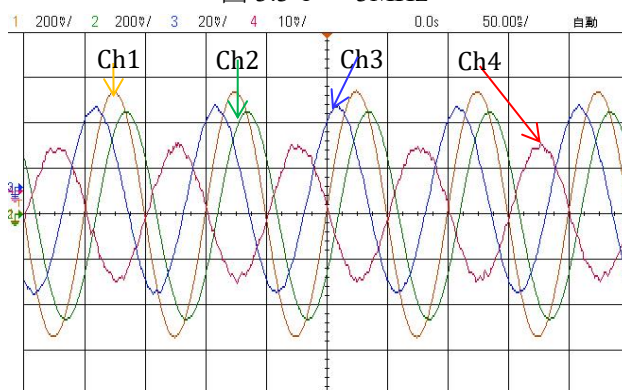


図 3.3-d 10MHz

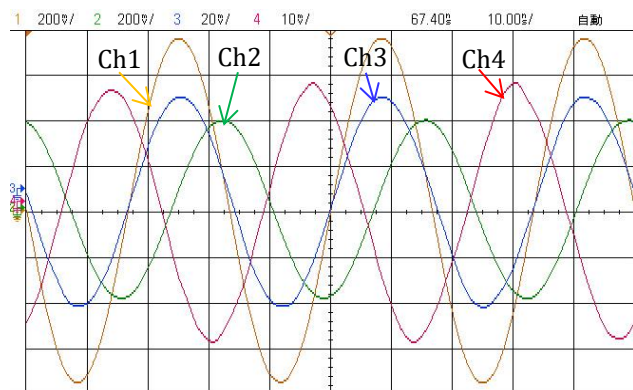


図 3.3-e 30MHz

以上