

アナログオシロスコープ

v2.2 Jun.2014

【目的】

アナログオシロスコープの動作原理を理解し、波形の同期、周波数測定、振幅・位相測定、XY モード測定等の波形測定に必要な基本操作を習得する。

【原理】

・CRT

図1上にアナログオシロスコープに使われているCRTの構造を示す。ヒータで加熱されたカソードから多数の電子が飛び出し、グリッドを通過して収束電子ビームが形成される。この電子ビームは、お互いのマイナス電荷の反発によって再び広がろうとするが、第1陽極と第2陽極の間にかけてられた電界の働きによって徐々に収束し、最終的に蛍光塗料が塗られたCRT表面で焦点を結ぶように調整される。このように広がった電子ビームを収束させる機構を電子レンズと呼ぶ。

電子ビームはマイナスの電荷を帯びた粒子の流れであるから、図1下に示すように第2陽極の後段に配置した偏向板に制御電界をかけることにより、その軌跡を上下左右に自在に走査させることができる。

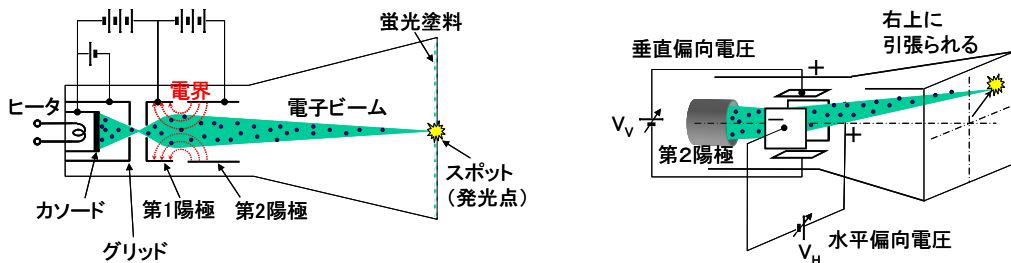


図1. CRTの断面構造(左)と偏向電極による電子ビームの走査(右)
偏向板に加えた電界によって、電子ビームの軌道を上下左右に自在に走査できる。

・リサージュ図

垂直偏向板に測定したい信号電圧を加え、水平偏向板に信号電圧と同一またはその整数倍の周期を有するのこぎり波を加えると、測定電圧の時間応答を観察することができる。これがオシロスコープの基本的な使い方であるが、水平偏向板に加える波形を信号電圧と同じ波形にすると、図2のように周波数比や位相差によって決まる固有の図形が描かれる。この図形をリサージュ図と呼んでいる。例えば、図3上のように周波数比1:2で位相差90°の正弦波が入力されたときのリサージュ図は図3下のようなになる。

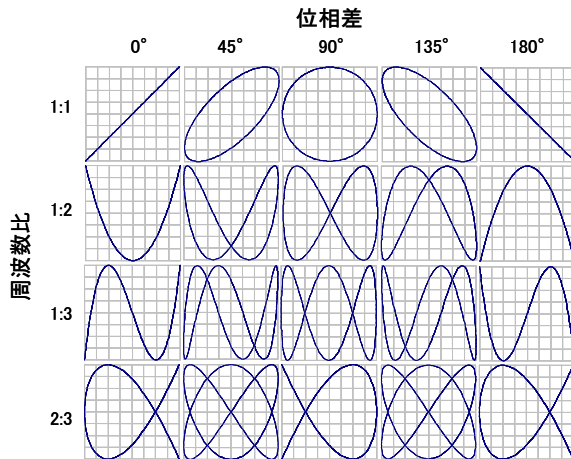


図2. 周波数と位相が異なる正弦波が入力されたときのリサージュ図

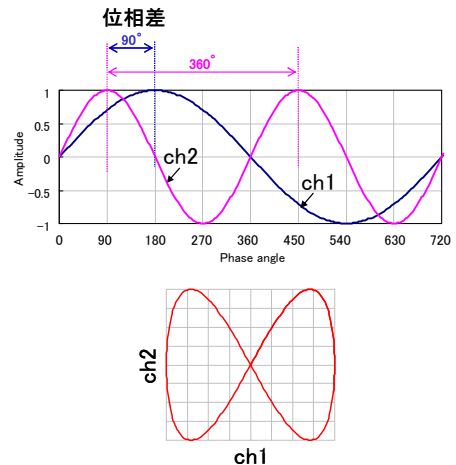


図3. 周波数比1:2、位相差90°の正弦波(上)が入力されたときのリサージュ図(下)

・AM 変調

簡単な例として、図4のように信号を乗せる搬送波(以降キャリアと呼ぶ)と音声やデータなど搬送波に乗せる信号波(以降ベースバンドと呼ぶ)が次の正弦波で表現できるAM波について考える。

$$\begin{cases} A \sin(2\pi Ft + \theta) & : \text{キャリア} \\ B \cos(2\pi ft) & : \text{ベースバンド} \end{cases} \quad (1)$$

この2つをミキサ(乗算器)に入力し、適当なフィルタを介すと次のような変調波が出力される。

$$\begin{aligned} E &= (A + B \cos 2\pi ft) \sin(2\pi Ft + \theta) \quad (2) \\ &= A(1 + m \cos 2\pi ft) \sin(2\pi Ft + \theta) \end{aligned}$$

ここで現れた $m = B/A$ (キャリア振幅に対するベースバンド振幅の比) を変調度と定義する。このとき、(2)式の最大値と最小値はそれぞれ

$$\begin{cases} E_{\max} = A(1+m) \\ E_{\min} = A(1-m) \end{cases} \quad (3)$$

となるから、ここで新たな定数 $K = E_{\max}/E_{\min}$ を定義すると、

$$K = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{A(1+m)}{A(1-m)} = \frac{1+m}{1-m} \quad (4)$$

となる。さらに(4)式を変形して m について求めると、

$$m = \frac{K-1}{K+1} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (5)$$

となり、時間波形の最大値 E_{\max} と最小値 E_{\min} から変調度 m が求まる。変調度 m は図5の台形リサージュ図からも求めることができる。

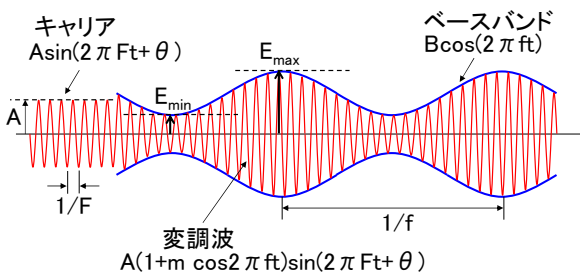


図4. AM 変調波の時間波形

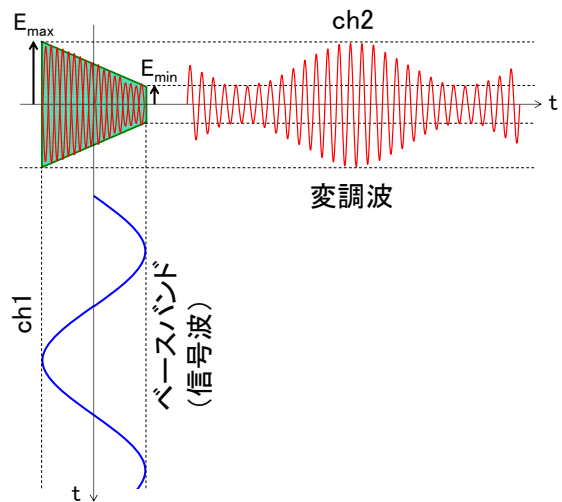


図5. AM 変調波と信号波のリサージュ表示

【測定系】

図 6 に測定回路図を示す。(a)はプローブによる校正測定回路、(b)および(b')は時間波形による振幅と周波数の測定回路、(c)はリサージュ図による周波数と位相差の測定回路、(d)および (d')は AM 変調度の測定回路、(e)はオシロスコープ帯域幅の測定回路である。

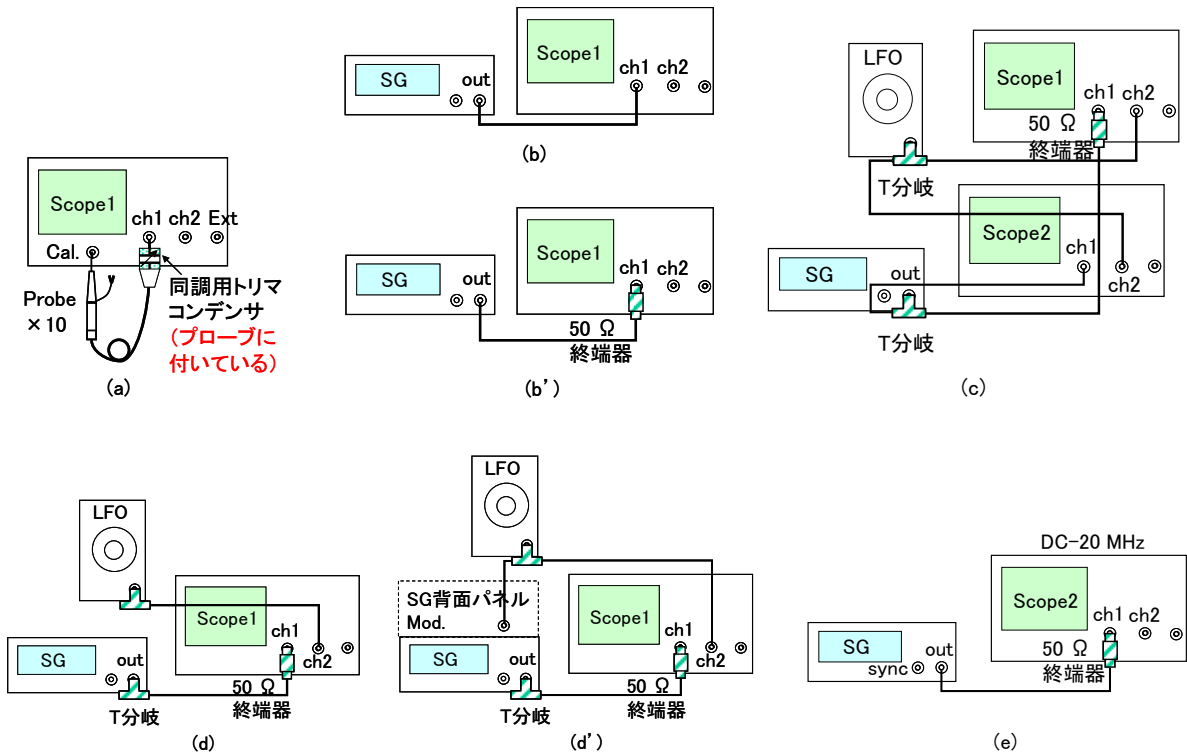


図 6. 測定回路 (a) プローブによる校正測定回路、(b) (b') 時間波形による振幅と周波数の測定回路、(c) リサージュ図による周波数と位相差の測定回路、(d) (d') AM 変調度の測定回路、(e) 帯域幅の測定回路

【使用機材】

表 1. 使用機材一覧(実験は 3 グループ又は 2 グループに分かれて行う)

品目	オシロ スコープ 1	オシロ スコープ 2	ファンクション ジェネレータ	オーディオ ジェネレータ	同軸-平衡 変換コネクタ	50Ω 終端器	T 分岐 コネクタ
略記号	Scope1	Scope2	SG	LFO	変換器	終端器	T 分岐
個数	1×3グループ	1×3グループ	1×3グループ	1×3グループ	1×3グループ	1×3グループ	2×3グループ
メーカー	HITACHI	IWATSU	Agilent	LEADER			
型番	V1560	SS-5702	33220A	LAG120B			
その他	帯域 100 MHz	帯域 20 MHz	帯域 20 MHz		BNC コネクタ	BNC コネクタ	BNC コネクタ

品目	マイナス ドライバ	オシロ スコープ 3					
略記号	Scope1	Scope3					
個数	1×3グループ	1×3グループ					
メーカー		Agilent					
型番		DSO3062A					
その他		帯域 60 MHz 1 GSa/s					

【測定方法】

1. プローブによる校正

- (1) Scope1、Scope2ともに振幅微調整ツマミと時間微調整ツマミ(灰色又は赤)が右一杯になっていることを確認する。
- (2) 図6-aの回路を組む。
- (3) PROBE ADJUST 端子(Cal.端子とも呼ぶ)に×10に設定したプローブ先端を接続し、プローブ出力を Scope1のCH1に入力する。プローブのGND端子は接続しなくてもよい。
- (4) オシロスコープの設定
 - HORIZONTAL MODE = A、VERTICAL MODE = DUAL、SOURCE = CH1、入力結合方式 = GND
 - まず POSITION $\Delta \nabla$ をまわして画面中央に2本の輝線がくるように調整する。
 - これが完了したら、入力結合方式 = DCに変更し、振幅レンジを適当な値に設定する。
 - INTENSITYと FOCUSを調整して輝線が綺麗に見えるように調整する。
 - <AUTO>ボタンを押すと自動的に2周期分の波形を表示してくれる。
- (5) 図7破線のように正しい矩形波(方形波またはパルス波とも呼ぶ)が表示されないときは、マイナスインドロバーでプローブ付属の同調可変トリマコンデンサの値を調整して波形のひずみを修正する。
- (6) Cal.端子に明記されている周波数と振幅の校正値をデータシート表1に記録する。
- (7) データシート1の要領で波形パラメータと画像を記録する。 V_{pp} は図8に示すように信号の最大値から最小値までの大きさを示す peak-peak 振幅であり、通常電気回路で使う V_{0-p} (GND-peak)振幅とは異なるので注意すること。CH1の POSITIONをまわして Peak-Peak 振幅が読みやすいように微調整する。VARIABLEをまわして周期が読みやすいように微調整する。
- (8) 同様にして ×1に設定した場合の波形も記録する。
- (9) 校正値と測定値がほぼ一致していることを確認できれば校正終了。

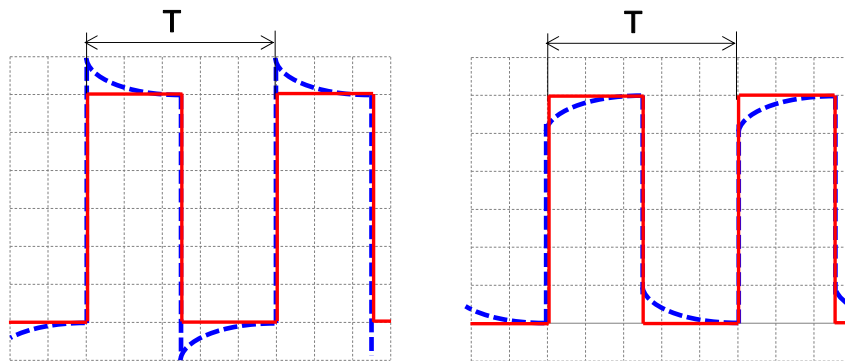


図7. コンデンサ調整不良の例(破線は調整不足なので、実線になるようにドライバで調整する)

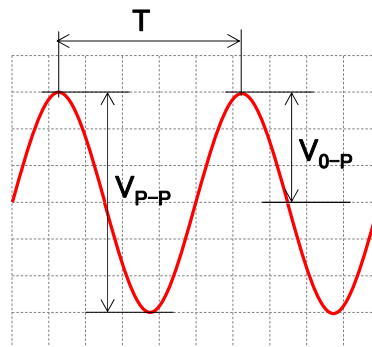


図8. V_{P-P} と V_{0-P} の違い

2. 振幅と周波数の測定

- (1) 図 6-b の回路を組む。
- (2) SG の設定
f=1 kHz、peak-peak 振幅=4 V_{pp} の正弦波 (Sine キーを押す。Freq が選択されていることを確認してから、数値キーで 1.0 を押し、下候補から単位 kHz を選択する。次に Ampl キーを押して、数値キーで 4.0 を押し、下の候補から単位 V_{pp} を選択する。最後に Output を押す)
- (3) オシロスコープの設定
VERTICAL MODE=CH1、SOURCE=CH1、入力結合方式=AC
- (4) 波形を観察しデータシート 2 の要領で 振幅 [V_{pp}]、周期 [ms]、周波数 [kHz] を読み取り、記録する。
- (5) SG の OUTPUT 端子の出力インピーダンス R_s [Ω] および、オシロスコープの INPUT 端子の入力インピーダンス R_o [Ω] (オシロスコープの INPUT 端子の入力インピーダンスは取り扱い説明書 p.29 の特性表で調べる)
- (6) 図 6-b' の回路のように、50 Ω 終端器(ターミネーターという)をつけた場合について上と同様の実験を行う。
- (7) SG ディスプレイに表示される振幅絶対レベルは、SG の内部抵抗 R_s と負荷抵抗 R_o の整合が取れたときの値を示している。実験 2-(5) および 2-(6) の測定結果を参考にして、50 Ω 終端器を挿入しないとき(図 9 左)、および挿入したとき(図 9 右)とでオシロスコープ表示振幅が異なって表示される現象を確認せよ。
- (8) Scope1 の代わりに Scope3 (デジタルオシロ) を用いて振幅と周波数を画面上に表示せよ。

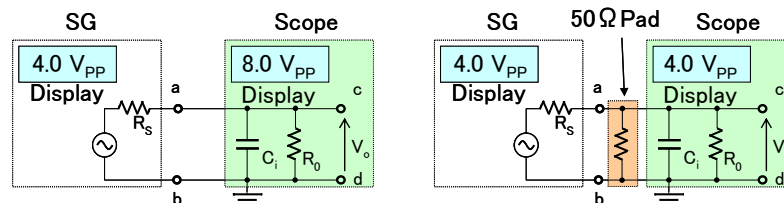


図 9. 50 Ωターミネーター(終端器)を挿入しない場合(左)と挿入した場合(右)の表示振幅の違い

3. リサージュ図による周波数比と位相差の測定

- (1) 図 6-c の回路を組む。
- (2) SG の設定
f=1.25 kHz、4 V_{pp} の正弦波
- (3) LFO の設定
f=1.25 kHz、4 V_{pp} の正弦波 (注)
(注) LFO には振幅表示が無いので、ATTENUATION を調整してオシロスコープ画面上で振幅を確認する。さらに OSC1、OSC2 ともに画面上で SG と LFO の波形が重なるように振幅レンジを調整しておく。
- (4) オシロスコープの設定
Scope1: VERTICAL MODE = DUAL、SOURCE = CH1、入力結合方式 = AC
Scope2: VERTICAL MODE = DUAL、SOURCE = CH1、入力結合方式 = AC、HORIZONTAL MODE = XY
(HORIZONTAL MODE は時間調整レンジと同じ意味)
- (5) 2 つの入力波形がはっきり見えるように、LFO の周波数ダイヤルを微調整する。周波数ドリフトの影響で、2 つの波形を完全に静止することはできないのである程度で妥協する。
- (6) 図 2 および図 3 を参照し、データシート 3 に示す要領で位相差が 0°、90° のときの時間波形とリサージュ図形を同時に記録する。
- (7) SG の設定は変えずに、LFO の周波数だけを 2.5 kHz に変えて同様に測定する。この際に Scope1 の SOURCE を CH2 に変えると測定しやすい。

4. AM 変調度の測定

- (1) 図 6-d の回路を組む。
- (2) SG の設定
f=1 MHz、4 V_{pp} の正弦波（以降これを搬送波: **キャリア**と呼ぶ）
続いて AM 変調の設定を行う: **Mod** キーを押して、**Ext モード**を選択^{※注}する。
Mod を ON にするとキャリア振幅は半分になるがそのままでもよい。
- (3) LFO の設定
f=1 kHz、4 V_{pp} の正弦波（以降これを信号波: **ベースバンド**と呼ぶ）
(LFO は振幅表示が無いので、Scope 上で振幅を確認する)
- (4) オシロスコープの設定
Scope1: **VERTICAL MODE = DUAL**、**SOURCE = CH2**、**入力結合方式 = AC**
- (5) データシート 4-1 の要領で、変調前の 2 つの正弦波(キャリアとベースバンド)の振幅と周波数を測定する。キャリア周波数を測定する際は **SOURCE=CH1** に設定変更する。
- (6) 外部変調信号の入力
図 6-d' の回路のように LFO の入力を分岐して、SG 背面パネルの **Modulation** ポートへ入力する。
ここではじめて、搬送波が振幅変調されて表示される。この際ベースバンド振幅が若干低下するので LFO の **ATTENUATION** で 4 V_{pp} に再調整する。
- (7) データシート 4-2 に示す要領で AM 変調波の E_{max} と E_{min} を測定し(図 4 参照)、さらに時間領域とリサージュ図の両方を記録する。リサージュ図(図 5 参照)を表示するには **XY ボタン** を同時に押す。さらに式(5)より変調度を求める。
- (8) **ベースバンド信号**を 8 V_{pp} の正弦波とした場合について、同様に(2)-(7)までの測定を行う。

5. オシロスコープ帯域幅の測定(周波数特性)

- (1) 帯域幅 20 MHz の **Scope2** を使用して、図 6-e の回路を組む。
- (2) SG の設定
f=1 MHz、6 V_{pp} (Mod は OFF)
- (3) オシロスコープの設定
VERTICAL MODE = DUAL、**SOURCE = CH1**
- (4) SG 周波数をデータシート 5 に示す各周波数に逐次設定し、**CH** の**入力結合方式**を **DC** と **AC** を交互に切り替えて振幅 [V_{pp}] を記録する。リサージュ図で振幅測定すると計測しやすい。
- (5) 最大振幅 6 V を基準にして周波数特性を式(6)より求め、図 10 に示す例のように周波数軸に片対数(エクセルを使うと簡単)を用いて dB 表示する。

$$\text{ゲインの計算式 } G[\text{dB}] = 20 \log_{10} (V_{pp} / 6) \quad (6)$$

- (6) この測定結果より、帯域幅 20 MHz のオシロスコープでは、入力電圧の大きさが $1/\sqrt{2} = 20 \log_{10}(1/\sqrt{2})$ [dB] となる高周波側の周波数はいくらになるか。

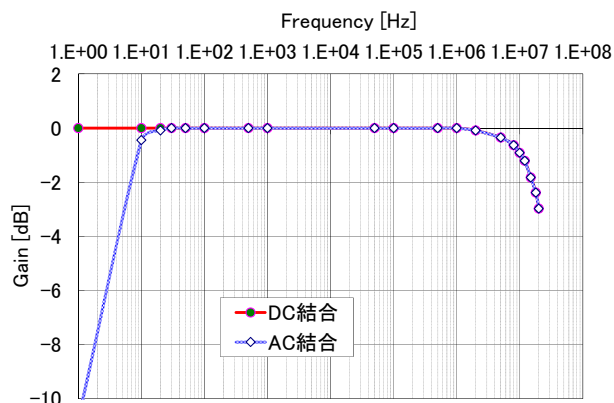


図 10. ゲイン周波数特性の測定例

【注意事項】

- (1) 測定レンジの Fine ツマミは右一杯にまわして(カチッと音がする状態で)使用する こと。
- (2) 測定データシート.xlsx はウェブからダウンロードできる。

【研究事項】

- (1) 図 11 はプローブを取り付けたオシロスコープの等価回路である。入出力の電圧比 V_o/V_i が周波数に依らず一定値となる条件を求めよ。さらに、このとき入力端子 a-b から見込んだインピーダンスを求めよ。
<http://www.dt.takuma-ct.ac.jp/~kusama/lecture/instrument/is4.6.pdf> に解答あり。
- (2) 本実験で使用したのはアナログオシロスコープである。波形解析で頻繁に使われるデジタルオシロスコープ(リアルタイムサンプリングと等価時間サンプリング)、スペクトラムアナライザについて調べよ。

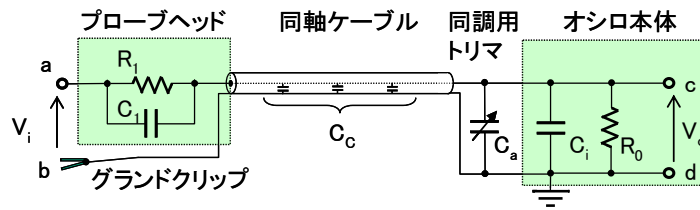


図 11. プローブを使用したオシロスコープの等価回路

【参考文献】

- [1] 中根、渡辺、葛谷、山崎 「わかる電子計測」 日新出版
- [2] 阿部、村山 「演習 電気・電子計測」 7章, 森北出版
- [3] 浅野、岡本、糸川、山下 「電子計測」 8章, コロナ社
- [4] 電子計測技術教育研究会 「これから始める人の新オシロ・ロジアナ入門講座」 pp.266-291, 電波新聞社
- [5] 田中 「オシロスコープ入門」 CQ 出版
- [6] ケンウッド 「オシロスコープ活用法」 CQ 出版

以上