

1 目的

トランジスタを用いた双安定マルチバイブレータを設計・制作し、外部からトリガパルスを周期的に入力したときの各部の波形を測定して、回路の動作を明確に理解することを目的とする。

2 原理

セルフバイアス型双安定マルチバイブレータの回路を図1に示す。

2つの安定状態 双安定マルチバイブレータには、次の2つの安定な状態がある。

安定状態1 パソコン Q1 が OFF

トランジスタ Q2 が ON

安定状態2 パソコン Q1 が ON

トランジスタ Q2 が OFF

回路解析 図1に示すセルフバイアス型双安定マルチバイブレータにおいて、トランジスタ Q1 が OFF でトランジスタ Q2 が ON の安定な状態にあるとする。

トランジスタ Q2 のコレクタとアース間にかかるテブナン電圧と図テブナン抵抗を求める。テブナン電圧 E_{C2} は、図2の回路から次の式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \{(R_1 + R_2) / (R_1 + R_2 + R_C)\} \cdot V_{CC} &= \{(15 + 6.8) / (15 + 6.8 + 2.2)\} * 12 \\ &= 10.90[V] \end{aligned}$$

テブナン抵抗 R_{C2} は、

$$\begin{aligned} \{(R_1 + R_2) \cdot R_C / (R_1 + R_2 + R_C)\} &= (15 + 6.8) \times 2.2 / (15 + 6.8 + 2.2) \\ &= 2.00[k\Omega] \end{aligned}$$

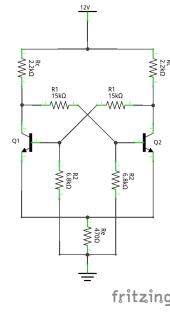


図1: セルフバイアス型双安定マルチバイブルータ

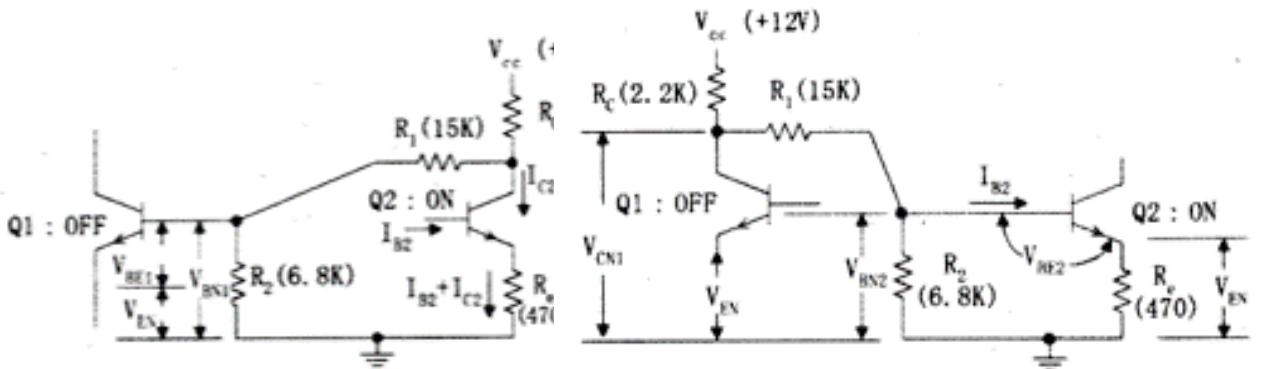


図 2: TrQ1 のベースと TrQ2 のコレクタの接続図 図 3: TrQ1 のベースと TrQ2 のコレクタの接続図

トランジスタ Q2 のベースとアース間にかかるテブナン電圧とテブナン抵抗を求める。テブナン電圧 E_{B2} は、図 3 の回路から次の式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \{R_2/(R_1 + R_2 + R_C)\} \cdot V_{CC} &= \{6.8/(15 + 6.8 + 2.2)\} \times 12 \\ &= 3.40[V] \end{aligned}$$

テブナン抵抗 R_{B2} は、

$$(R_1 + R_C) \cdot R_2 / (R_1 + R_2 + R_C) = (15 + 2.2) \times 6.8 / (15 + 6.8 + 2.2) = 4.87 [k\Omega]$$

トランジスタ Q2 のコレクタおよびベース端子にかかるテブナン電圧とテブナン抵抗が求まつたので、トランジスタ Q2 側は図 4 の回路と等価である。図 4 の回路のベース側をコレクタ側の閉回路において、次の式が成り立つ。

$$R_{B2} \cdot I_{B2} + R_e(I_{B2} + I_{C2}) = E_{B2} - V_{BE(sat)}$$

$$R_{C2} \cdot I_{C2} + R_e(I_{B2} + I_{C2}) = E_{C2} - V_{CE(sat)}$$

値を代入すると、

$$4.87 \times I_{B2} + 0.47 \times (I_{B2} + I_{C2}) = 3.40 - 0.7$$

この連立方程式を解くと、次のように求まる。

$$I_{B2} = 126[\mu A]$$

$$I_{C2} = 4.31[mA]$$

この安定状態 1 におけるトランジスタ Q2 の h_{FE} は、

$$h_{FE} = I_{C2}/I_{B2} = 34.2$$

となり、能動領域のトランジスタ Q2 の h_{FE} が 100 前後なので、トランジスタ Q2 は過飽和領

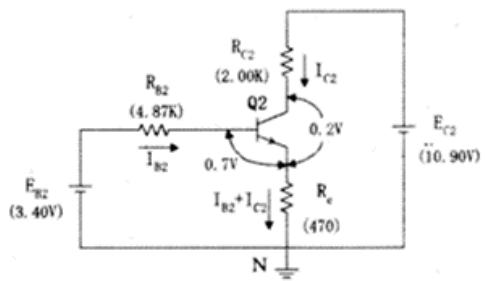


図 4: 非安定マルチバイブレータ

域にあることが分かる。抵抗 R_e における電圧
降下 V_{EN} は、

$$V_{EN} = 0.47 \times (0.126 + 4.31) = 2.08[V]$$

トランジスタ Q2 のコレクタ電位は、 $V_{CE_{sat}} = 0.2[V]$ とすると、

$$V_{CN2} = V_{CE2} + V_{EN} = 0.2 + 2.08 = 2.28[V]$$

トランジスタ Q2 のベース電位は、

$$V_{BN2} = V_{BE2} + V_{EN} = 0.6 + 2.08 = 2.68[V]$$

トランジスタ Q1 のベース電位は、

$$V_{BN1} = V_{CN2} + R_2/(R_1 + R_2) = 0.71[V]$$

トランジスタ Q1 のベースエミッタ間の電圧は、

$$V_{BE1} = V_{BN1} - V_{EN} = 0.71 - 2.08 = -1.37[V] < 0[V] (TrQ1 : OFF)$$

したがって、トランジスタ Q1 は遮断領域にあることが分かる。トランジスタ Q1 のコレクタ電位は、

$$V_{CN1} = V_{CC} \cdot R_1 / (R_C + R_1) + V_{BN2} \cdot R_C / (R_C + R_1) = 10.81[V]$$

となる。以上のことから、安定状態 1 における各部の電圧と電流は、

$I_{C1} = 0[mA]$	$I_{C2} = 0[mA]$
$I_{B1} = 0[\mu A]$	$I_{B2} = 126[\mu A]$
$V_{CN1} = 10.81[V]$	$V_{CN2} = 2.28[V]$
$V_{BN1} = 0.71[V]$	$V_{BN2} = 2.68[V]$
$V_{BE1} = -1.37[V]$	$V_{BE2} = 0.7[V]$
$V_{EN} = 2.08[V]$	

となる。外部からトランジスタ Q2 のベースに負のトリガパルスが入力されると、トランジスタ Q2 が OFF、トランジスタ Q1 が ON になり安定状態 2 となる。トランジスタ Q1 と Q2 の特性が同じだと仮定すると、安定状態 2 における各部の電圧と電流は、

$I_{C1} = 4.31[mA]$	$I_{C2} = 0[mA]$
$I_{B1} = 126[\mu A]$	$I_{B2} = 0[\mu A]$
$V_{CN1} = 2.28[V]$	$V_{CN2} = 10.82[V]$
$V_{BN1} = 2.68[V]$	$V_{BN2} = 0.71[V]$
$V_{BE1} = 0.7[V]$	$V_{BE2} = -1.37[V]$
$V_{EN} = 2.08[V]$	

となる。このことから、この双安定マルチバイブレータのスイング幅は、

$$10.81 - 2.28 = 8.53[V]$$

となる。

正帰還作用による反転動作 トランジスタ Q1 が OFF , トランジスタ Q2 が ON の安定状態 1 にあるとき , トランジスタ Q2 のベースに負のトリガパルスが入力されたときの動作を考える .

Q2 のベースに負のトリガパルスが加えられた瞬間 , $V_{BE2} < 0[V]$ となり , トランジスタ Q2 は OFF となる . トランジスタ Q2 が OFF になると , トランジスタ Q2 のコレクタ電位 V_{CN2} が V_{CC} の値に近づく . V_{CN2} が高くなると , 相対的にトランジスタ Q1 のベース電位 V_{BN1} が高くなり , $V_{BE1} > 0.6[V]$ となり , トランジスタ Q1 が ON 状態になる . Q1 が ON になるとトランジスタ Q1 のコレクタ電流 I_{C1} が流れ Q1 のコレクタ電位 V_{CN1} は低くなる . V_{CN1} が下がると相対的にトランジスタ Q2 のベース電位 V_{BN2} も下がり , Q2 のベースエミッタ間電圧 V_{BE2} が小さくなる . V_{BE2} が小さくなるとトランジスタ Q2 もベース電流 I_{B2} は減少し , コレクタ電流 I_{C2} も減少し , コレクタ電位 V_{CN2} はより高くなる . この正帰還作用が繰り返され , 最終的にトランジスタ Q1 が ON(飽和領域) , トランジスタ Q2 が OFF(遮断領域) の安定状態 2 となる .

トランジスタ Q1 が ON , トランジスタ Q2 が OFF の安定状態 2 にあるとき , トランジスタ Q1 のベースに負のトリガパルスが入力されると同じように正帰還作用が働きトランジスタ Q1 が OFF , トランジスタ Q2 が ON の安定状態 1 になる .

スピードアップコンデンサの働き 図 6 の回路において , トリガパルスが入力されると , 一瞬トランジスタ Q1 と Q2 はともに OFF となる . トリガパルスが入力される前の状態が , トランジスタ Q1 が OFF でトランジスタ Q2 が ON の安定状態 1 であったとする . このとき , コンデンサ $C_1 = 8.05[V]$, $C_2 = 1.67[V]$ の電圧がかかっている .

トリガパルスが入力されると , トランジスタ Q2 のコレクタ電位は $V_{CN2} = 2.37[V]$ から $V_{CN2} = 10.9[V]$ になる . その瞬間 , トランジスタ Q1 のベース電位は $V_{VB1} = 2.77[V]$ から $V_{BN1} = 10.9 - 8.05 = 2.85[V]$ に引き上げられる . このとき , トランジスタ Q1 と Q2 はともに飽和領域にあるが , トランジスタ Q1 のほうが Q2 に比べてはるかに過飽和の状態にある .

一瞬後 , 負のパルスがなくなった瞬間 , $V_{BN1} = 9.32[V]$, $V_{BN2} = 2.77[V]$ になり , トランジスタ Q1 は過飽和領域にあり $V_{CN1} = 0.2[V]$ となり , $V_{BN2} = 0.2 - 8.05 = -7.85[V]$ となり , トランジスタ Q2 は OFF となる . すなわち , トランジスタ Q1 が ON でトランジスタ Q2 が OFF の安定状態 2 となる .

もし , スピードアップコンデンサがなければ , 負のパルスが入った瞬間トランジスタ Q1 と Q2 はともに OFF となり , $V_{CN1} = V_{CN2} = 10.9[V]$, $V_{BN1} = V_{BN2} = 3.40[V]$ となり , トランジスタ Q1 と Q2 は ON となり , トランジスタの特性や抵抗値の誤差などから一方が ON で他方が OFF

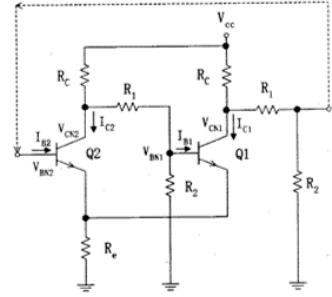


図 5: 二段増幅回路の働き (正帰還)

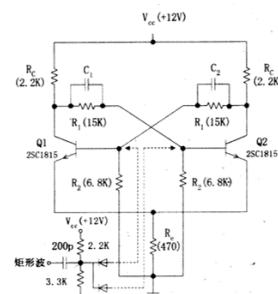


図 6: セルフバイアス型双安定マルチバイブレータ

となる。次のトリガパルスが入っても同じ現象が起こり、ONになり易いほうが常にONとなり、状態が反転しない。

スピードアップコンデンサは、充電されている電圧の違いによって前の安定状態を記憶しており、次にトリガパルスが加わったとき安定状態の反転を間違なくやってのける働きを持っている。ここでは説明を省略するが名前の示すように、他にもコレクタ電流波形の立ち上がり・立ち下がりを速やかにし、立ち上がり時間・立ち下がり時間を短くする役割をはたす。

3 セルフバイアス型双安定マルチバイブレータの設計

トランジスタ Q1 が OFF でトランジスタ Q2 が ON という安定状態 2 となる条件を考える .

トランジスタ Q2 が ON になる条件 図 4 のトランジスタ Q2 が ON のときの等価回路に於いて , 次の式が成り立つ .

$$R_{B2} \cdot I_{B2} + R_e(I_{B2} + I_{C2}) = E_{B2} - V_{BE(sat)}$$

$$R_{C2} \cdot I_{C2} + R_e(I_{B2} + I_{C2}) = E_{C2} - V_{CE(sat)}$$

この連立方程式を I_{C2} と I_{B2} について解くと

$$I_{C2} = \{(E_{C2} - V_{CE(sat)})(R_{B2} + R_e) - (E_{B2} - V_{BE(sat)})R_e\}/A$$

$$I_{B2} = \{(E_{B2} - V_{BE(sat)})(R_{C2} + R_e) - (E_{C2} - V_{CE(sat)})R_e\}/A$$

ここで , $A = (R_{C2} + R_e)(R_{B2} + R_e) - R_e^2$

これらの式から , R_2 に対する R_1 の上限が得られる .

トランジスタ Q1 が OFF になる条件 図 2 において , 次の関係が成り立つ .

$$\begin{aligned} I_2 &= I_{CBO} + I_1 \\ V_{BN1} &= R_2 I_2 \\ &= V_{EN} + V_{CE(sat)} - R_1 I_1 \\ &= V_{EN} + V_{CE(sat)} - R_1 (I_2 - I_{CBO}) \end{aligned} \tag{1}$$

したがって ,

$$I_2 = (V_{EN} + V_{CE(sat)} + R_1 I_{CBO})/(R_1 + R_2)$$

トランジスタ Q1 が OFF になるためには

$$V_{BN1} \leq (V_{EN} + V_{CE(sat)} + R_1 I_{CBO}) \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

よって , R_2 に対する R_1 の下限は

$$R_1 \leq R_2 \cdot (V_{EN} + V_{CE(sat)} - V_{BN1}) / (V_{BN1} - R_2 I_{CBO})$$

V_{BN1} はカットオフベース電圧である。これは $0.5[V]$ 程度の逆バイアスであるが、実用上では $0[V]$ とおいてよい。

R_2 に対する R_1 の上限と下限の式から、図 7 のようなグラフが得られる。このグラフの上限と加減に囲まれる範囲の R_1 と R_2 を選んで回路を制作する。

図 7 のグラフを求めることができない場合は、 $V_{CC} = 12[V]$, $R_C = 2.2[k\Omega]$, $R_e = 470[\Omega]$, と設定し、 R_2 の値を適当に選び（例えば $R_2 = 6.8[k\Omega]$ ），これらの値を上限と下限の式に代入して R_1 を算出する。

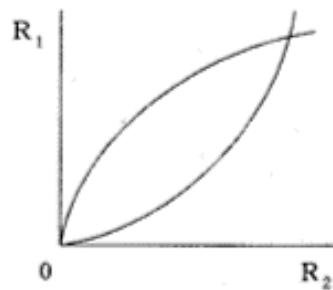


図 7: ON と OFF の
条件を満たす R_1 と R_2 の関係

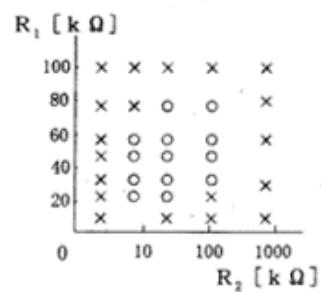


図 8: 動作の範囲

4 実験手順

4.1 回路制作

図 1 の回路を制作する .

4.2 動作の確認

手動で Q1 のベースと Q2 のベースを交互にアースヒショートさせることでセット , リセットを行い , Q1 と Q2 のコレクタ端子をオシロスコープで観測し , 安定状態 1 と安定状態 2 が交互に移り変わることを確認する .

4.3 反転動作の確認

図 6 の微分回路を組み込み , ダイオードを介してベース端子に接続する . 発振器の矩形波の出力を微分回路に入力し , マルチバイブレータの動作をオシロスコープで観測する . トリガパルスが入力される度に , マルチバイブレータの安定状態が反転するかどうか調べる .

4.4 スピードアップコンデンサの追加と反転動作の確認

反転動作がうまく行われないことを確認したならば , スピードアップコンデンサを接続して , 今度は反転動作がうまく行われていることを確認する .

4.5 分解能周波数の測定

スピードアップコンデンサの値を変えて , 分解能周波数を測定する .

5 使用器具

今回の実験において , 以下の表に示す器具を用いて測定を行った .

表 1: 使用器具

使用器具名	型番	管理番号等
ディジタルオシロスコープ	DSO3062A	BH43H17S00000021
多出力直流安定化電源	PW26-1AT	20" と書いた黄色いシールのあるもの
直流安定化電源	PR18-1.2A	い 102 383
直流電圧計	2051-05	い 54 102
低周波発振器	AG-203E	20" と書いた黄色いシールのあるもの
デジタル・マルチメータ	VOAC86A	20" と書いた赤いシールのあるもの

6 実験結果

6.1 回路制作

以下、図 9 に図 1 の回路図をもとに実際に作成した回路の写真を示す。

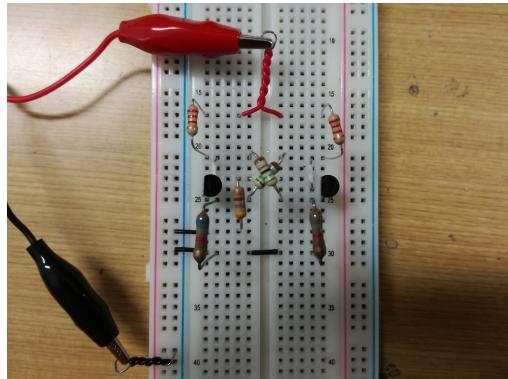


図 9: 制作した回路

6.2 動作の確認

実験データ紛失のため、測定結果なし。

6.3 反転動作の確認

実験データ紛失のため、測定結果なし。

6.4 スピードアップコンデンサの追加と反転動作の確認

実験データ紛失のため、測定結果なし。

6.5 分解能周波数の測定

6.1 に示した回路を用いて、4.5 の実験を行った。その測定値を表 2 に、グラフを図 10 に示す。

表 2: 分解能周波数の測定

静電容量 [pF]	周波数 [Hz]
150	625000
220	515500
330	420200
470	322600
680	243900
1000	188700
2200	81970
2700	70420

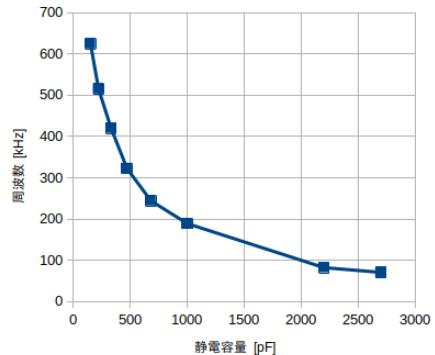


図 10: 測定値のグラフ

実験データ紛失のため，波形の測定結果なし.

7 考察

データの紛失により、実験手順 4.2 ~ 4.4までの実験の結果がないため、私が使用できる器具で 4.2 の実験を再現した。以下にその手順を示す。

7.1 実験

7.1.1 実験回路の制作

今回測定に際し、オシロスコープが使える状況にいなかったため、Arduino の Analog 入力を使用して波形の観測を試みることとした。以下、図 11 に使用した回路図と、図 12 に制作した回路の写真を示す。

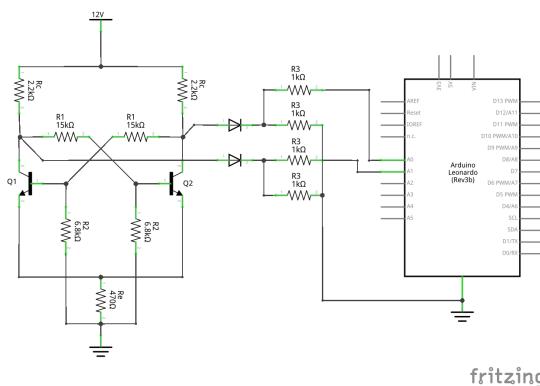


図 11: 回路図

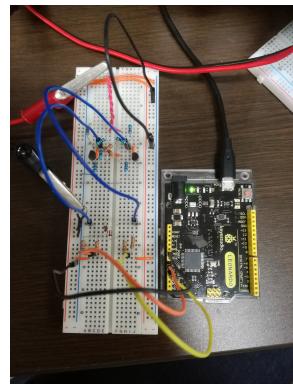


図 12: 制作した回路

7.1.2 測定

Arduino に測定用のスケッチをアップロードし、Arduino から送られてくるシリアル通信のログからグラフを作成し、実験手順 4.2 の実験の波形の観測を試みた。以下、図 13 に Arduino にアップロードしたスケッチを、図 14 に測定結果のグラフを示す。

```
sketch_sep30a | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help
sketch_sep30a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(2000000);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  Serial.print(analogRead(0));
  Serial.print(",");
  Serial.println(analogRead(1));
}
```

図 13: 使用したスケッチ

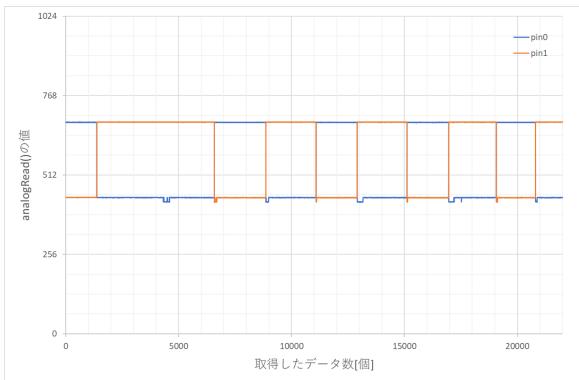


図 14: 制作した回路

7.1.3 結果

以上のように、実際に安定状態 1 と安定状態 2 が交互に移り変わることが確認できた。

8 吟味事項

8.1 スピードアップコンデンサの役割について、実験をもとに考察する。

スピードアップコンデンサは、充電されているか否かの状態に応じて、それぞれすばやく電圧を上昇させたり、下降させたりすることが可能であるため、回路の動作がうまく行くと考えられる。

9 感想

今回、不慮の事故によってデータを紛失してしまったため、波形を測定した実験の結果が全く無い状態になってしまった。今後はデータの管理には万全を期したい。