

順序回路および電気・電子回路の実験 ー導入ー

1. はじめに

順序回路および電気・電子回路の実験のうち、「順序回路（１）（２）」はこれまでに座学で学習したデジタル回路、論理回路の内容の確認となっている。また、「ダイオードとトランジスタの特性」、「演算増幅器とアクティブフィルタ」は、４年生で学習する「電子回路」に向けた予習用実験となっている。

本実験では、以下のことを目的としている。

- (1) 実験を通して、理論を具体的な現象に結びつけて理解すること。
- (2) 計測機器の取り扱いを身につけること。
- (3) 実験データを表やグラフにまとめる力を身につけること。

2. 実験レポートの書き方

順序回路および電気・電子回路の実験では、手書きレポートで提出が原則である。実験レポートは以下の構成でまとめること。

- ・表紙：

実験レポートの表紙を書く（前期の実験の「工学実験の手引き」を参照）

- ・目的：

実験の目的を書く。

- ・実験内容：

実験内容の項目、使用機器を書く。

- ・原理・解説：

実験の原理・解説を簡潔にまとめ書く。

- ・実験方法：

実験方法および実験手順を分かりやすく書く。回路図も書くこと。

- ・実験結果：

実験結果をまとめて書く。測定結果は表にまとめグラフに書く。順序回路では結果をタイムチャートにまとめ書く。

- ・考察・研究課題：

考察や研究課題を調べ書く。実験で理解したことをまとめ、書く。

- ・参考文献：

レポートを書くにあたって参考にした図書や文献を書く。

（＊詳細については、前期の実験の「工学実験の手引き」を参照すること）

補足：各実験テーマでは、実験結果のまとめに、以下のタイムチャートと回路図あるいは表とグラフが必要になる。レポート提出時に、報告漏れがないか確認すること。また、グラフ用紙は事前に各自で準備しておくこと（片対数グラフは、バイコンで販売している）。

・順序回路（１）

タイムチャート（５）	<ul style="list-style-type: none"> ・リセット付き自己保持回路 ・インターロック回路 ・並列優先回路 ・新入力優先回路 ・直列優先回路
回路図（１）	<ul style="list-style-type: none"> ・早押しクイズの回路

・順序回路（２）

タイムチャート（５）	<ul style="list-style-type: none"> ・Dフリップフロップ ・JKフリップフロップ ・2ビット2進カウンタ ・4ビット2進カウンタ ・4ビットシフトレジスタ
------------	---

・ダイオード・トランジスタの特性

表（３）	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイオードの順方向特性と逆方向特性の測定結果 ・トランジスタの電圧，電流測定結果 ・トランジスタ出力特性の測定結果
グラフ（２）	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイオードの順方向特性と逆方向特性（方眼グラフ） ・トランジスタの出力特性（方眼グラフ）

・演算増幅器とアクティブフィルタ

表（５）	<ul style="list-style-type: none"> ・反転増幅器の入出力測定結果 ・反転増幅器の R_F による出力測定結果 ・非反転増幅器の入出力測定結果 ・非反転増幅器の R_F による出力測定結果 ・1次形ローパスフィルタの増幅率測定結果
グラフ（３）	<ul style="list-style-type: none"> ・反転増幅器・非反転増幅器の入出力特性（方眼グラフ） ・積分器の入出力波形（スケッチ）（方眼グラフ） ・1次形ローパスフィルタの周波数特性（片対数グラフ）

（ ）内の数は，それぞれの報告数を表す

ダイオード・トランジスタの特性

1. 目的

ダイオードおよびトランジスタの基本的な性質について理解する。

2. 実験内容

- ・ダイオードの順方向特性と逆方向特性、トランジスタの増幅作用・スイッチング作用、トランジスタの出力特性

[使用機器]

直流電源装置、電池ボックス 1 (乾電池 1 個)、電池ボックス 2 (乾電池 2 個)、
回路基板 1 (ダイオード、トランジスタ 実装済み)、
回路基板 2 (トランジスタのスイッチング特性測定用回路の一部実装済み)、
デジタルテスタ (電圧計測用)、電流計 1 (mA 計測用)、電流計 2 (μ A 計測用)

3. 解説

3.1 半導体と電気伝導

物質の原子は原子核と電子から成り立っていて、大部分の電子は原子核に捉えられていて自由に動くことができない。熱や光などのエネルギーをもらった時、一部の電子が原子核の束縛をふり切って自由に動きまわれるようになる。それを自由電子という。自由電子は電圧をかけるとすぐ動くことができるので、電流が流れたことになる。物質の中にいくらたくさんの電子が含まれていても、動くことができないければ、その物質に電圧をかけても電流が流れない。したがって、物質の中で自由電子を多く含むもの (金属等) が導体となり、自由電子がないもの (木やプラスチック等) は絶縁体となる。半導体は導体と絶縁体の中間の性質をもつ物質で、常温では自由電子をわずかに含んでいる。

半導体において、電子は原子核のまわりで一定のエネルギー的な位置をしめており、自由電子となってそこをとびだしてしまうとその位置が孔となる。そこはもともと電子があつて電氣的なバランスがとれていたのに、負電荷がなくなるから、正の電荷がそこにあらわれたのと同等の作用をする。これを正孔 (ホール) と呼んでいる。正孔も電圧をかけると動くことができるので (注意: 実際には正孔付近にあった電子が正孔に入って、電子のあった場所が新たに正孔になる)、その移動によって電子の場合と同様、電流が流れる。半導体においては、自由電子も正孔も電荷を運ぶことができるので、両方ともキャリアと呼ばれる。半導体の中でキャリアとして自由電子が多いものを N 型半導体、正孔が多いものを P 型半導体という。電氣的なバランスからいえば、N 型は負の電荷が、P 型では正の電荷が過剰となっている。

3.2 ダイオードと整流作用

P 型半導体と N 型半導体を原子のレベルで結合し、両方に電極をつけたものを PN 接合ダイオードという。その構造と記号を図 1 に示す。

ダイオードに電圧をかける方法は 2 通りあり、図 2 の (a) と (b) である。図 2 (a) の場合を「順方向電圧 (順方向バイアス)」と言い、ダイオードに大きい電流が流れる。また、図 2 (b) の場合を「逆方向電圧 (逆バイアス)」と言い、電流はほとんど流れない。

このように電圧の極性により一方向のみ電流が流れる現象を「整流作用」という。また、印加した電圧の極性により、電流が流れたり（オン状態）、流れなかったり（オフ状態）することを「スイッチング作用」という。

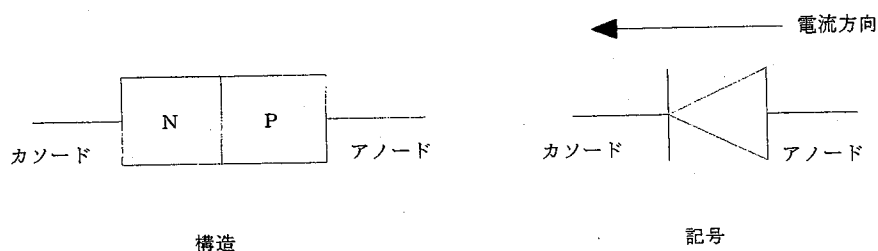


図1 ダイオードの構造と記号

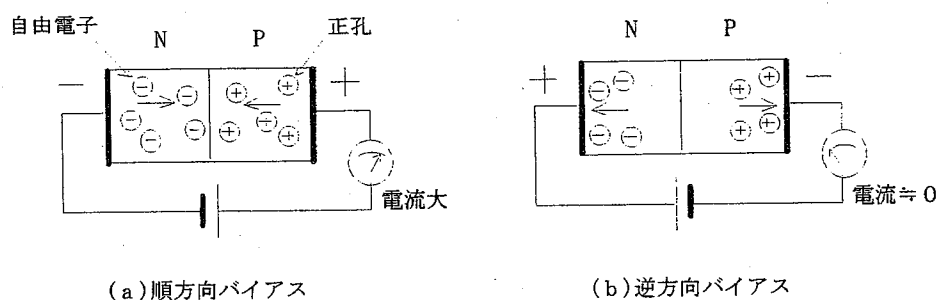


図2 ダイオードの整流作用

3.3 トランジスタ

図3に示すようにP型およびN型半導体を3層に組み合わせた素子をトランジスタといい、組み合わせ方によりNPN型とPNP型がある。中間層をベース(B)、両側の片方をコレクタ(C)、他方をエミッタ(E)という。

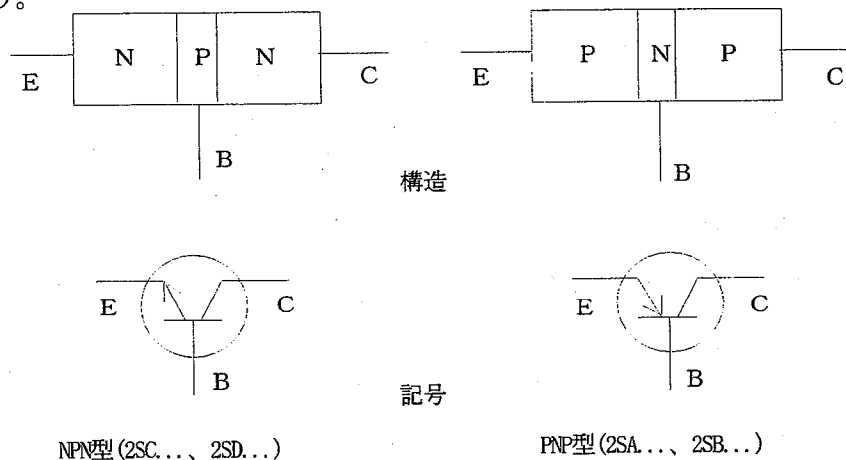


図3 トランジスタの構造と記号

NPN型とPNP型は、電極にかかる電圧や流れる電流の極性がまったく逆になるほかは、同じ特性であると考えてよい。したがって、今回の実験ではNPN型のみ扱う。

3.3.1 トランジスタの増幅作用

トランジスタの各端子に適正に電圧をかけておき、ベース端子からエミッタ端子に流れる微小電流を変化させると、この変化をきっかけに、コレクタ端子からは、その変化に比例して、大振幅になった電流がエミッタ端子に向かって流れだす。この現象を増副作用という。トランジスタに増幅作用を行わせるためには、通常はエミッタ端子を共通として、ベース端子を入力、コレクタ端子を出力として使用する。

- (1) 各端子への適正な電圧(直流バイアス)のかけ方

$$\begin{aligned} V_B > V_E & \quad V_B \doteq V_E + 0.7 \text{ [V]} \\ V_C > V_E & \quad V_C \text{ は } V_B \text{ より数V以上大きくする。} \end{aligned}$$

- (2) 電流の関係

$$\begin{aligned} I_E &= I_C + I_B \doteq I_C \\ I_B &\ll I_C \quad (I_B \text{ は } \mu\text{A} \text{、} I_C \text{ は mA 単位}) \\ \frac{I_C}{I_B} &= h_{FE} \quad (\text{直流電流増幅率という}) \end{aligned}$$

- (3) 最大定格

トランジスタを使用するときに絶対に守らねばならない電圧・電流・電力・温度などの範囲を最大定格という。これを越えて使用すると、トランジスタが劣化したり、焼け切れたりする。最大定格としては、

コレクタ・ベース間電圧	V_{CBO} (電圧)
エミッタ・ベース間電圧	V_{EBO} (電圧)
コレクタ電流	I_C (電流)
コレクタ損失	P_C (電力)
PN 接合温度	T_j (温度)

等が決められている。このうちコレクタ損失は、 $P_C = V_{CE} \cdot I_C$ が一定となる双曲線 (図 10) である。トランジスタがいつもこの双曲線の左下部分で動作するようにしなければならない。

3.3.2 トランジスタのスイッチング動作

図 4 に NPN 型トランジスタのエミッタ接地静特性を示す。4 本の曲線は、それぞれ、ベース電流が異なる 4 つの場合の特性を示している。この図において、ベース電流 $I_B = 0$ の場合の動作点は点 A である。この時、コレクタ電流 I_C はリーク電流しか流れない。この時の状態を「遮断状態」または「カットオフ状態」という。この状態から、ベースーエミッタ電圧を増やしていくとベース電流も増えていく。すると、動作点は負荷直線状を B の方へ移動していく。やがて、これ以上ベースーエミッタ電圧 (ベース電流) を増やしても I_C が増加しない状態になる。このような状態を「飽和状態」または「オン状態」という。「遮断状態」と「飽和状態」という 2 つの状態を使うことで、トランジスタをスイッチのように動作させることができる。飽和状態におけるトランジスタの各端子間の電圧は、およそ図 5 のようになっている。

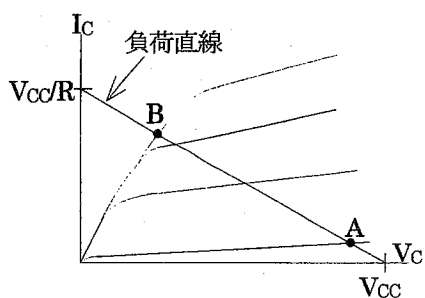


図4 トランジスタの静特性

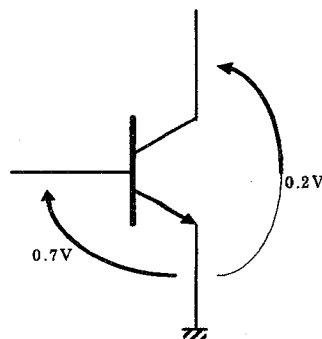


図5 飽和状態の端子間電圧

4. 実験方法

4.1 ダイオードの順方向特性と逆方向特性

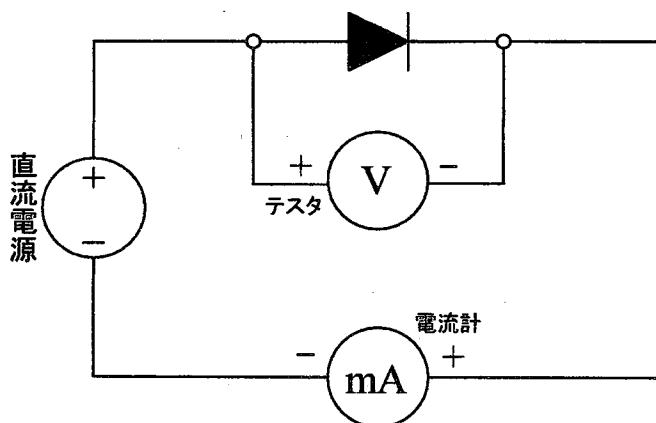


図6 ダイオードの順方向特性測定回路

- (1) 図6のように測定回路を接続する。
- (2) 直流電源装置の電圧ダイヤルを変化させ、ダイオードの順方向特性を測定する。
- (3) 電流が 30[mA]を超えない範囲で電圧－電流特性を測定する（電圧は、0.00、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.51、0.52、0.53、0.54、0.55、0.56、0.57、0.58、0.59、0.60、0.61、0.62、0.63、0.64、0.65、0.70、0.77）。ただし、図7の特性例を参考に、特性曲線の変化が激しい箇所では測定点が少ない場合は、追加して測定すること。
- (4) 次に、カソード側が直流電源装置のプラス側になるように接続する。
- (5) 直流電源装置の電圧ダイヤルを変化させ、ダイオードの逆方向特性を測定する（電圧は、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、6.00、7.00、8.00、9.00、10.00）。

★測定結果を表1のように整理し、図7のようにグラフを描く。

表1 ダイオードの順方向特性と逆方向特性の測定結果

順方向特性		逆方向特性	
電圧 [V]	電流 [mA]	電圧 [V]	電流 [μ A]

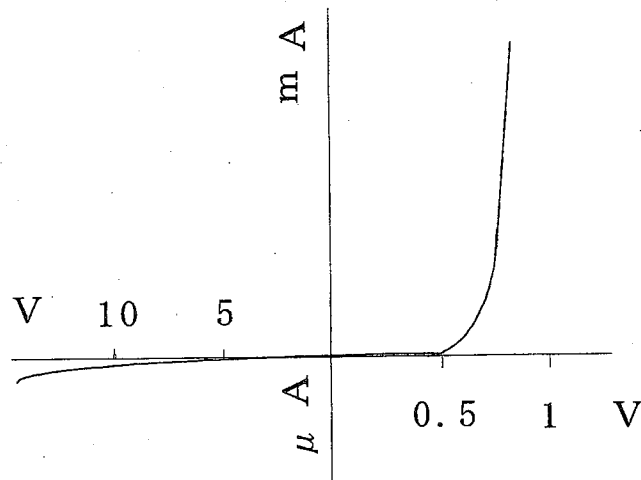


図7 ダイオードの順方向特性と逆方向特性

注意：この図にはダイオードの逆方向特性も併せて示している

4.2 トランジスタの増幅作用・スイッチング作用

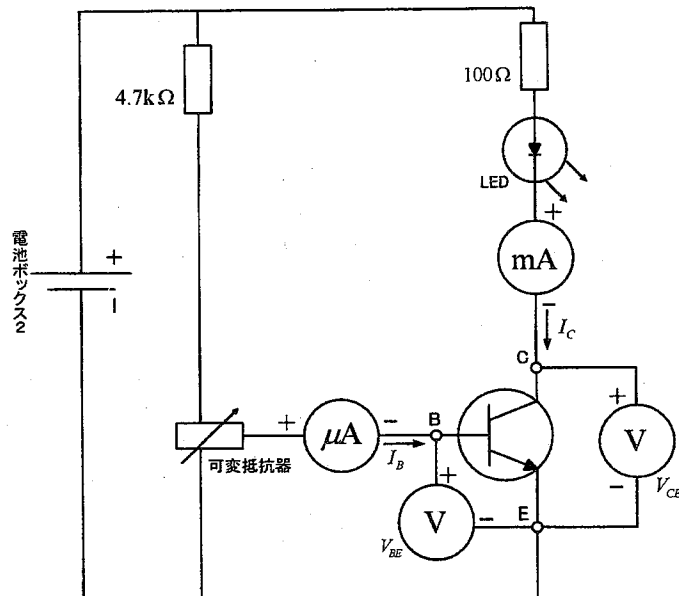


図8 トランジスタの入力特性、電流伝達特性測定回路

- (1) 図8のように回路を接続する。なお回路を接続する際、電流 I_B 、 I_C の測定単位に注意すること。
 I_B は $[\mu A]$ 、 I_C は $[mA]$ である。また、電源には電池ボックス2を用いること。
- (2) 電池を入れる前に、可変抵抗器のつまみを反時計回りにいっぱいに戻しておく。
- (3) 電池を入れ、可変抵抗器のつまみを時計方向に回していき、 V_{BE} (ベース-エミッタ間電圧)を変化させる。そのときの V_{CE} ・ I_B ・ I_C の値を測定する。(電圧 V_{BE} [V]は、0.00、0.40、0.50、0.60、0.62、0.64、0.66、0.67、0.68、0.69、0.70、0.71) ただし、特性の変化が激しい箇所、測定点が少ない場合は追加して測定すること。

★測定結果を表2のように整理する。

表2 トランジスタの電圧、電流測定結果

V_{BE} [V]	I_B [μ A]	I_C [mA]	V_{CE} [V]

4.3 トランジスタの出力特性

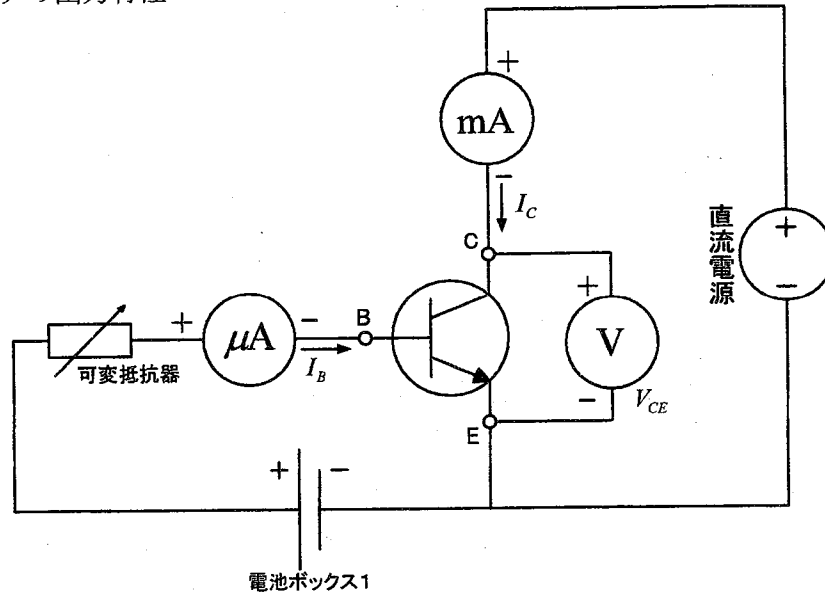


図9 トランジスタの出力特性測定回路

- (1) 図9のように回路を接続する。なお、可変抵抗器は回路基板2のボリュームを転用する。
- (2) 可変抵抗器のボリュームつまみを調整して、 I_B (ベース電流) が $30[\mu\text{A}]$ になるように調整する。次に、直流電源装置の電圧ダイヤルで V_{CE} (コレクターエミッタ間電圧) を変化させ、そのときの I_C (コレクタ電流) を測定する。なお、このとき電圧ダイヤルを動かすと I_B も少し変化するので、つまみを再び調整する (電圧 V_{CE} [V] は、0.00、0.05、0.07、0.09、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20、0.22、0.24、0.26、0.28、0.30、0.50、0.70、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00、10.00)。ただし、図9の特性例を参考に、特性曲線の変化が激しい箇所で測定点が少ない場合は、追加して測定すること。また、 $P_C = 100$ [mW] 以下 (電圧と電流の積が 100 [mW] 以下 : 図10の双曲線の左下) の範囲で測定する。
- (3) 同様にして $I_B = 60[\mu\text{A}]$ および $I_B = 90[\mu\text{A}]$ でも測定する (電圧 V_{CE} [V] は、0.00、0.05、0.07、0.09、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20、0.22、0.24、0.26、0.28、0.30、0.50、0.70、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00、10.00)。

★測定結果を表3のように整理し、図10のようにグラフを描く。

表3 トランジスタ出力特性の測定結果

$I_B = 30[\mu A]$		$I_B = 60[\mu A]$		$I_B = 90[\mu A]$	
$V_{CE} [V]$	$I_C [mA]$	$V_{CE} [V]$	$I_C [mA]$	$V_{CE} [V]$	$I_C [mA]$

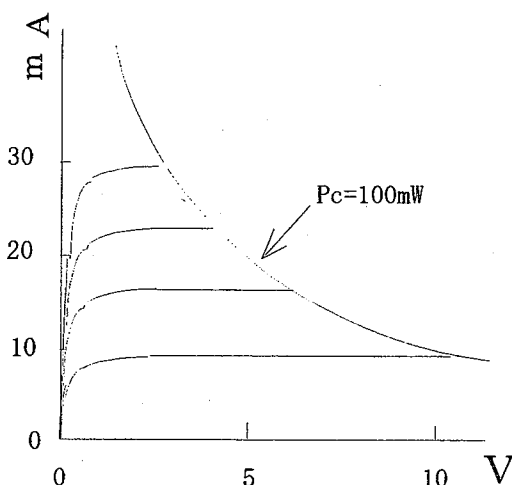


図10 トランジスタの出力特性

5. 考察

(1) ダイオードの整流作用がなぜおこるのか、図2の(a)、(b)と関連付けて説明せよ。

(2) NPN 型および PNP 型トランジスタの構造をダイオードの記号を使って表せ。

(例: PN+PN)

(3) 実験結果より、トランジスタの電流増幅作用とスイッチング作用を説明せよ。

(4) トランジスタの測定で、 $P_C = 100[mW]$ 曲線より左下の部分についてのみ測定するのはなぜか、説明せよ。

(5) 図10のグラフが飽和した部分で $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ を電流増幅率という。 $V_{CE} = 5[V]$ で I_B が $30[\mu A]$ から $60[\mu A]$ に変化したとき、 I_C はどれだけ変化したか。また、電流増幅率はいくらか。

(6) 今回の実験から、自分が理解できたことを報告せよ。

改訂 2012/7/28 H.Sori

改訂 2014/3/20 N.Yabuki

改訂 2016/8/11 T.Okada

改訂 2017/8/30 M.Kawai

改訂 2018/9/6 M.Kawai

演算増幅器とアクティブフィルタ

1. 目的

演算増幅器 (Operational Amplifier, 以下オペアンプという) の動作原理を, 基本回路の特性を測定することで理解するとともに, アクティブフィルタへの応用例を学ぶ。

2. 実験内容

- ・オペアンプの基本回路 (反転増幅回路, 非反転増幅回路, 積分回路)
- ・アクティブフィルタ

[使用機器]

オペアンプ実験装置, 2 現象オシロスコープ, デジタル電圧計, 直流電源装置,
アクティブフィルタ学習装置, 2 チャンネルエレクトリック電圧計,
発振器 (ファンクション・ジェネレータ),
(片対数グラフ用紙)

3. 原理

3.1 オペアンプ

オペアンプは, 理想に近い電気信号増幅特性を有する半導体電子回路素子である。反転増幅回路, 非反転増幅回路, 差動増幅回路など, 簡単な外部素子の接続でさまざまな電子回路 (アナログ回路) を構築できる。

3.2 アクティブフィルタ

フィルタは, 入力信号から目的とする周波数だけを取り出す電子回路のことで, 次のようなフィルタがある。

- (1) ローパスフィルタ (LPF): 直流から目的の周波数までの信号を通過させ, それ以上の周波数の信号を阻止
- (2) ハイパスフィルタ (HPF): 目的の周波数以上の信号を通過させ, それより下の周波数の信号を阻止

フィルタは, 抵抗・コイル・コンデンサの能動素子を組み合わせて構成できる。なかでも抵抗 R とコンデンサ C の組み合わせが簡便で, 広く使われている。

図 1 は, 2 次形 CR ローパスフィルタの原理図である。しかし, この回路は減衰が大きかったり入出力インピーダンスが適切でなかったして実用にならない。

図 2 は CR フィルタにオペアンプを組み合わせた回路であり, これにより

- 回路に利得を持たせる
- 高入力インピーダンスで低出力インピーダンスにできる
- 回路の自由度を大きくできる

などの利点を持つフィルタが実現できる。このように, 能動素子を使ったフィルタをアクティブフィルタという。

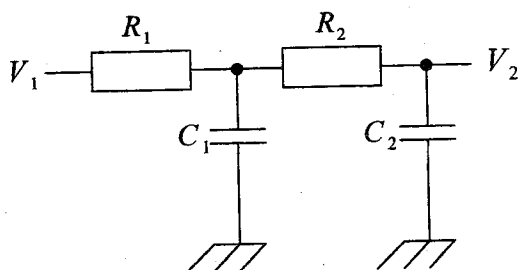


図1 2次形CRフィルタ

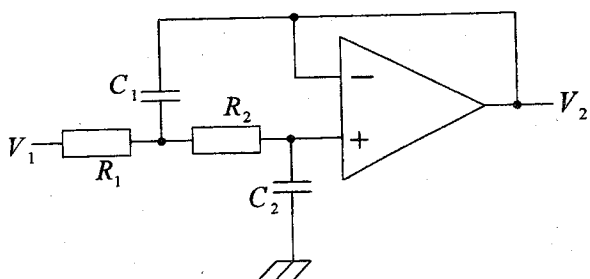


図2 2次形ローパスアクティブフィルタ

アクティブフィルタの特性として、カットオフ周波数 f と、カットオフ周波数付近での減衰特性を決める Q とがある。図2では、

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (1)$$

(R, C のみの1次回路では $f = \frac{1}{2\pi RC}$ を使用する)

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \quad (2)$$

と表すことができる。しかし、ハイパスフィルタの Q は、(3)式のように表す。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \quad (3)$$

実際のアクティブフィルタの設計方法は、以下のように計算し、素子値を選ぶ。ハイパスフィルタの場合、図2の抵抗とコンデンサを入れ替えた回路となる。

・ローパスフィルタの設計方法

$R_1 = R_2 = R_f$ にして

$$C_f = \frac{1}{\omega R_f} \quad (4)$$

$$C_1 = 2QC_f \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{C_f}{2Q} \quad (8)$$

・ハイパスフィルタの設計方法

$C_1 = C_2 = C_f$ にして

$$R_f = \frac{1}{\omega C_f} \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{R_f}{2Q} \quad (7)$$

$$R_2 = 2QR_f \quad (9)$$

ここで、 ω : 角周波数であり $\omega = 2\pi f$ である。

4. 実験方法

4.1 オペアンプの基本回路

4.1.1 反転増幅回路

- (1) 図3の反転増幅回路を、 $R_S = R_F = 10\text{k}\Omega$ （抵抗の値は4桁程度に詳しく測定し、報告書にて報告すること。以下同じ）として構成せよ。
 - (2) V_1 を $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ （電源電圧の範囲内）で 2V 毎に変化させ、 V_2 と v_s を測定せよ。
 - (3) 次に、 R_F を変化させて、 V_2 の変化を測定せよ。ただし、 V_1 は 1V 一定にする。
- ★反転増幅回路の入出力測定結果を表1のように整理し、図5のようにグラフを描く。
また、(3)に関しては表3のように整理する。

4.1.2 非反転増幅器

- (1) 図4の非反転増幅器を、 $R_S = R_F = 10\text{k}\Omega$ として構成せよ。
 - (2) V_1 を $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ で 2V 毎に変化させ、 V_2 と v_s を測定せよ。
 - (3) 次に、 R_F を変化させて、 V_2 の変化を測定せよ。ただし、 V_1 は 1V 一定にする。
- ★非反転増幅器の入出力測定結果を表2のように整理し、図5のようにグラフを描く。
また、(3)に関しては表3のように整理する。

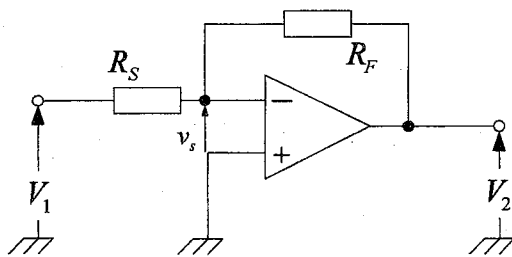


図3 反転増幅器

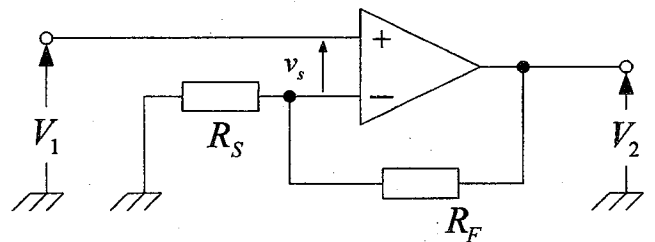


図4 非反転増幅器

表1 反転増幅器の入出力測定結果

入力電圧 V_1 [V]	出力電圧 V_2 [V]	v_s [V]	倍率 $\frac{V_2}{V_1}$
-10			
-8			
-6			

表2 非反転増幅器の入出力測定結果

入力電圧 V_1 [V]	出力電圧 V_2 [V]	v_s [V]	倍率 $\frac{V_2}{V_1}$
-10			
-8			
-6			

表 3 R_F による出力測定結果

抵抗 R_F [Ω]	出力電圧 [V]	倍率 $\frac{V_2}{V_1}$
5k		
10k		
30k		

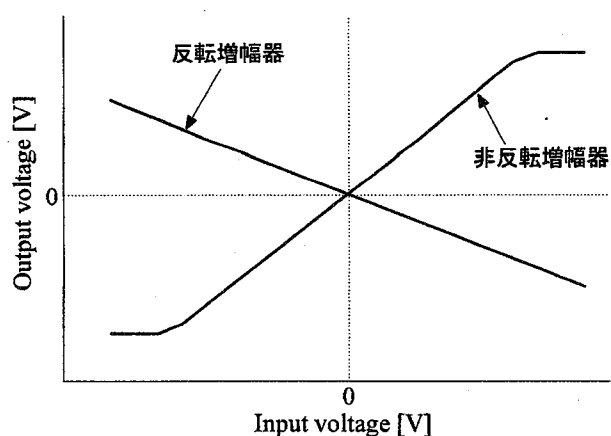


図 5 反転増幅器・非反転増幅器の入出力特性

4.1.3 積分器

- (1) 図 6 は積分器の原理図である。 $R_S = 10k\Omega$, $C_F = 0.022\mu F$ (抵抗値, 容量値はテスターで実際に測定し, 報告書にて報告すること) として, これを構成せよ。
- (2) V_1 に正弦波を入れ, オシロスコープで入力電圧 V_1 の大きさと周波数および出力電圧 V_2 の大きさと V_1 との位相を測定する。

★積分器の入出力波形を, 図 7 のようにグラフを描く。このとき, オシロスコープの VOLT/DIV (電圧感度), TIME/DIV (掃引時間) も記入すること。

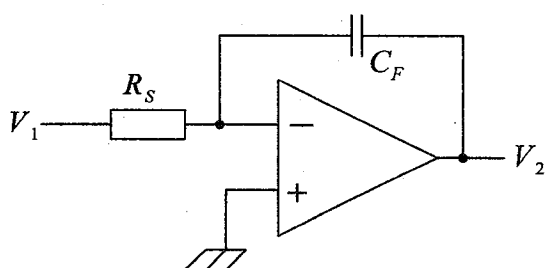


図 6 積分器の原理図

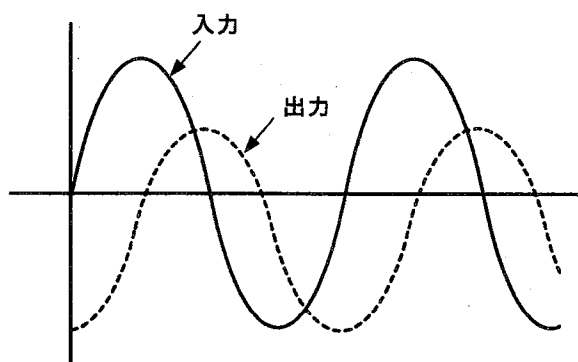


図 7 積分器の入出力波形

4.2 アクティブフィルタ

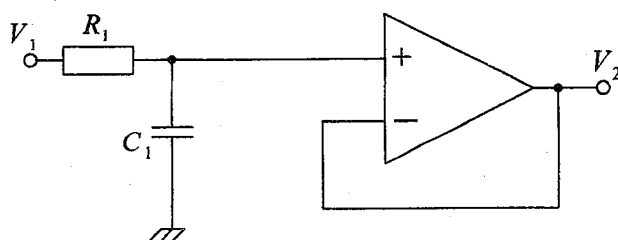


図8 1次形ローパスフィルタ

- (1) 図8のローパスフィルタを次の値で構成せよ。抵抗値、容量値はテスターで実際に測定し、報告書にて報告すること)

$$C_1 = 1000 \text{ pF}, R_1 = 16 \text{ k}\Omega$$

- (2) 発振器の出力（常に1V一定の電圧に保つこと）を V_1 として入力し、さらに周波数を変化させ、これに対する出力電圧を測定する（周波数[Hz]は、100, 500, 700, 1k, 2k, 3k, 4k, 5k, 6k, 7k, 8k, 9k, 10k, 14k, 18k, 20k, 40k, 50k, 100k）。また、増幅率は(10)式を用いて計算せよ。

★ローパスフィルタの増幅率測定結果を表4のように整理し、図9のように片対数グラフに描く。

表4 ローパスフィルタの増幅率測定結果

入力 周波数 [Hz]	入力電圧 [mV]	出力電圧 [mV]	増幅率[dB]

$$G_v = 20 \log \frac{\text{出力電圧}}{\text{入力電圧}} \quad (10)$$

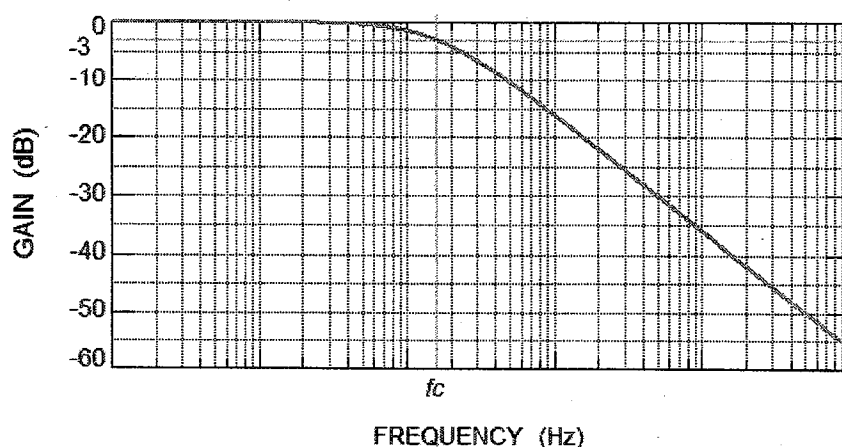


図9 ローパスフィルタの周波数特性

5. 考察

- (1) 反転増幅回路における入力 V_1 と出力 V_2 の関係式は、次のように表される。

$$V_2 = -\frac{R_f}{R_s} V_1 \quad (11)$$

式(11)を導出せよ。また、実験 (4.1.1) の結果より(11)式が成り立つことを示せ。

- (2) 非反転増幅器における入力 V_1 と出力 V_2 の関係式は、次のように表される。

$$V_2 = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) V_1 \quad (12)$$

(12)式を導出せよ。また、実験 (4.1.2) の結果より(12)式が成り立つことを示せ。

- (3) 積分器における入力 V_1 と出力 V_2 の関係式を、 C_F , R_S , ω を使って示せ。また、実験(4.1.2)

の結果より、積分器の積分計算について、原理上の計算値と測定値を比較せよ。

- (4) 実験 (4.2) のローパスフィルタにおいて、「カットオフ周波数」、「阻止域」、「通過域」の意味を調べ説明せよ。

- (5) 実験 (4.2) のローパスフィルタにおいて、増幅率が 3dB 低下する周波数（カットオフ周波数）と、阻止域に入った時の傾きを[dB/oct]単位で求めよ。

ここで、oct は周波数が 2 倍になる点を意味し、カットオフ周波数から周波数が 2 倍に変化した場合の増幅率の変化量を求めれば良い。

- (6) 実験 (4.2) のローパスフィルタにおいて、カットオフ周波数の計算値と上記(5)で求めた測定値とを比較せよ。

- (7) 今回の実験から、自分が理解できたことを報告せよ。

改訂 2011/3 N.Yabuki

改訂 2012/7/26 H.Sori

改訂 2014/3/20 N.Yabuki

改訂 2015/8/31 N.Yabuki

改訂 2016/8/11 T.Okada

改訂 2017/8/30 M.Kawai

改訂 2018/9/6 M.Kawai

順序回路（１）

1. 目的

論理ゲートを組み合わせた順序回路の製作を通して、順序回路の動作原理について理解する。

2. 実験内容

論理回路トレーナーを使用して順序回路の製作と動作確認を行う。

〔使用器具〕

論理回路トレーナー，AC アダプター，論理 IC，ジャンパー線

3. 解説

3.1 順序回路

論理回路は、現在の入力の値によって出力の値が決定される組合せ論理回路と、回路内に記憶要素を持ち、過去から現在までの入力の値や順序によって出力の値が決定される順序回路がある。ここでは順序回路について学ぶ。

順序回路の例として、早押しクイズの回路がある（図１）。早押しクイズでは、最初にボタンを押した回答者のランプが点灯し、遅れてボタンを押した回答者のランプは点灯しない。入力（ボタン）が ON に変化したとき、過去に入力がなければ対応する出力（ランプ）が ON に変化する。このように、現在までの入力の順序により出力の値が決定されている。

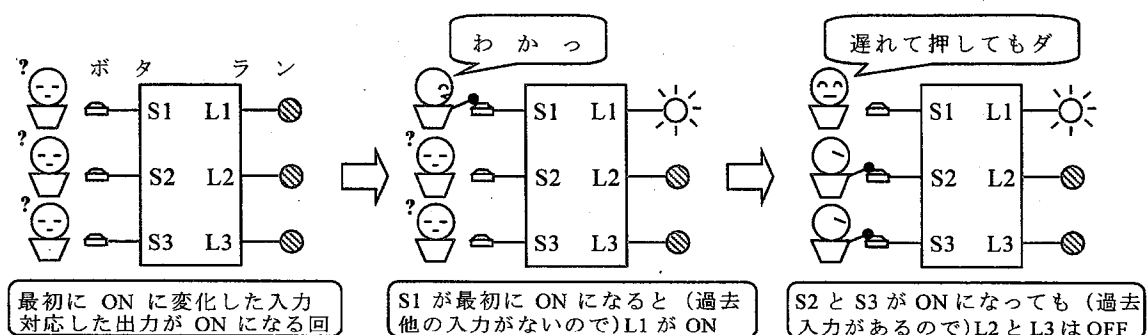


図１ 早押しクイズの回路

早押しクイズでは、回答権を得た回答者がボタンを放しても（入力が OFF に変化しても）ランプは点灯したままである（出力の値が保持される）。また、ある回答者のランプが点灯しているとき（ある出力が ON のとき）、他の回答者がボタンを押しても自分のランプは点灯しない（入力が ON になっても出力は変化しない）。

順序回路は、出力の値（回路の状態）を保持し、現在の入力と出力の値によって次の瞬間の出力の値が決定する回路といえる。

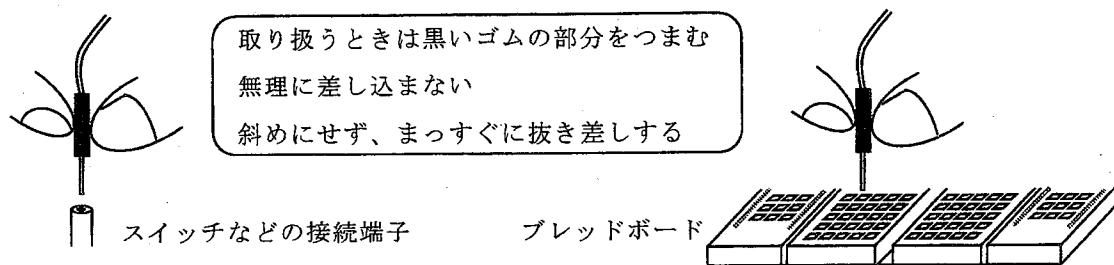


図3 ジャンパー線の扱い方

4.4 データスイッチと発光ダイオードの確認

- (1) データスイッチを OFF(下側)にする。
- (2) ジャンパー線を使って、データスイッチ SW0 と発光ダイオード L0 を接続する (SW0 の接続端子はスイッチの上側に、L0 の接続端子は LED の下側にある)。
- (3) S0 を ON(上側)にして、L0 が点灯することを確認する。
- (4) 上記と同様にして、S1～S7 の操作により L1～L7 が点灯／消灯することをそれぞれ確認する。

4.5 プッシュボタンの確認

- (1) プッシュボタンの上側にある端子と発光ダイオード L0 をジャンパー線で接続する。
- (2) プッシュボタンを押している間だけ L0 が点灯することを確認する。

4.6 クロックパルスの確認

- (1) 周波数切り替えスイッチを 1 Hz(上側)にする。
- (2) ジャンパー線を使って、周波数切り替えスイッチの上側にある端子と発光ダイオード L0 を接続する。
- (3) L0 が定期的に点滅することを確認する。

4.7 ブレッドボードの確認

図4に示すように、論理回路トレーナーのブレッドボードは、ボード A (2個) とボード B に分かれている。

ボード A の各端子 (穴) は内部で横方向に電氣的につながった 2つのブロックに分かれており、主に電源配線用に使用する。赤い線が付いている方を+電源、青い線が付いている方を-電源 (GND) の配線に使用する。

ボード B の各端子 (穴) は内部で縦方向に電氣的につながった 63×2 のブロックに分かれている。IC や抵抗などの配線に使用する。IC は中央の溝を挟んで上下にピンが出てくるように取り付ける。

4. 論理回路トレーナーの準備

4.1 論理回路トレーナーの構成と各部名称

図2に論理回路トレーナーの外観を示す。中央にあるブレッドボード上に論理 IC などを装着し、論理 IC の各端子を配線で接続することで、論理回路を製作する。入力データの切り替え（0 か 1 か）には、データスイッチを使用する。出力内容の確認には、発光ダイオードを使用する。

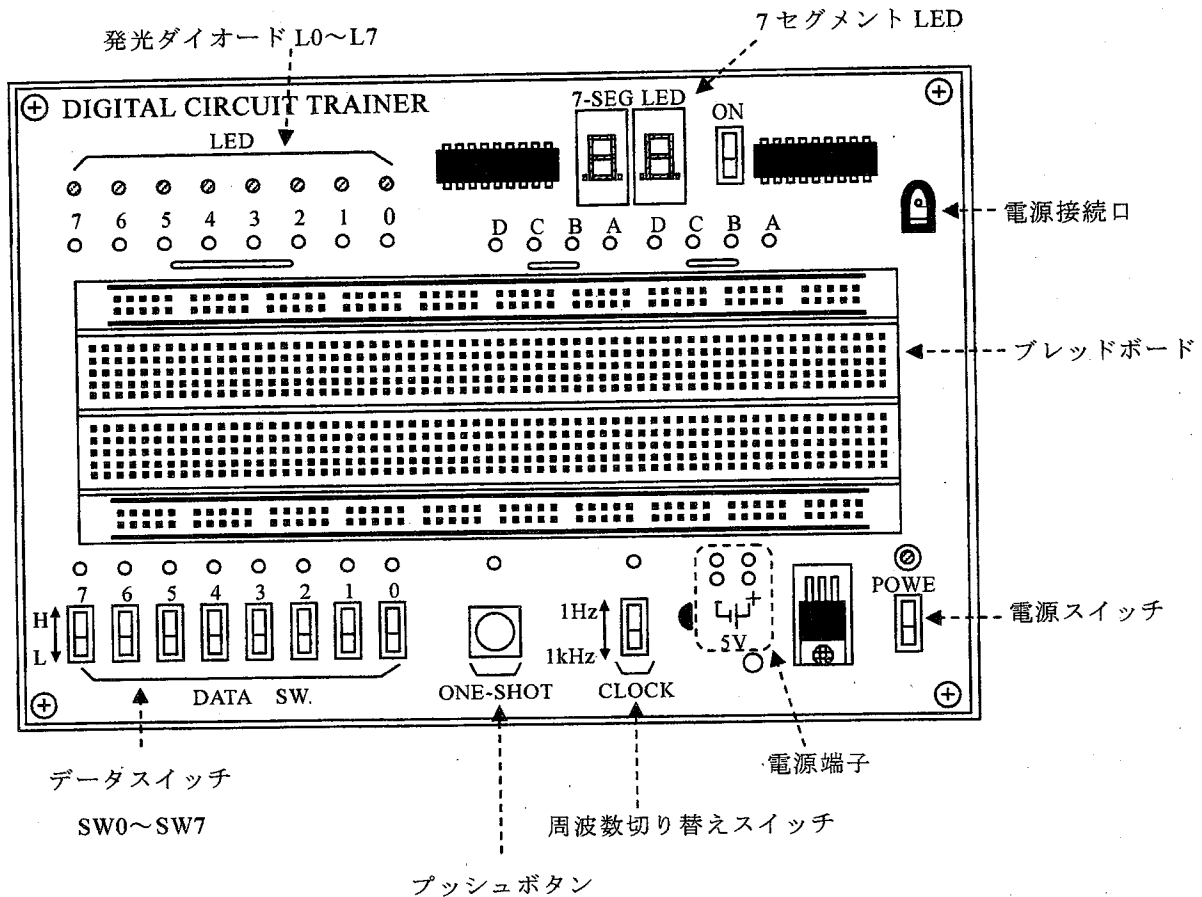


図2 論理回路トレーナーの外観図

4.2 電源の確認

- (1) 付属のACアダプターの電源プラグを電源(コンセントまたはOAタップ)に接続する。
- (2) ACアダプターの接続端子を論理回路トレーナーの電源接続口に接続する。
- (3) 論理回路トレーナーの電源スイッチをON(上側)にする。
- (4) 電源ランプが点灯していることを確認する。

4.3 ジャンパー線を使う際の注意点

- (1) 端子に差し込むときや取り外すときは、ピンのそばの黒いゴムの部分をつまむ(図3)。
- (2) ブレッドボードの穴やスイッチの端子に対してまっすぐ、ゆっくり差し込む(図3)。
- (3) 差し込めないときは、力を入れて差し込まず、ピンの場所を少し変更してみる。
- (4) 取り外すときも、まっすぐに引き抜く。

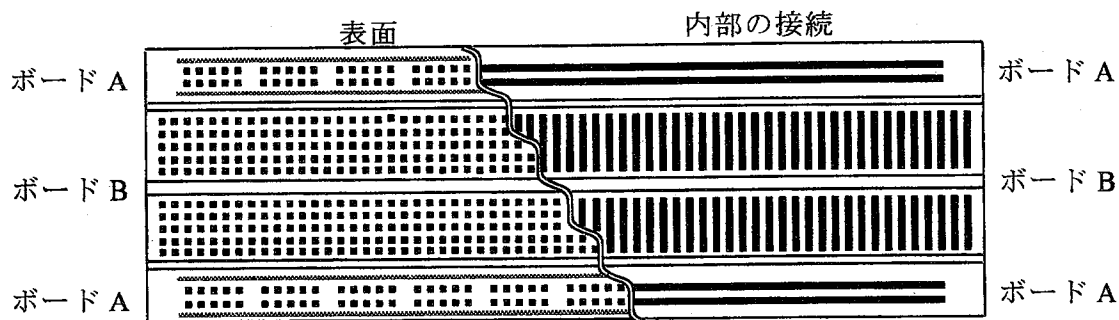


図4 ブレッドボードの構成

5. 実験の準備

5.1 論理 IC の構成と使い方

論理 IC としては TTL (Transistor Transistor Logic) の 74 シリーズがよく知られている。実験ではその中の 74HC シリーズを使用する。個々の論理 IC の種類とピン配置は実験テキスト p.10 の図 1 6 に示されている。

論理 IC は DIP (Dual Inline Package) と呼ばれる形状をしている (図 5)。ピンの番号を確認するときは、型番が刻印されている面を上にして、半円の切り欠きマークを左にする。このとき、左下の 1 番ピンから順番に反時計回りに番号が付けられている。14 ピンの DIP では、通常、左上の 14 番ピンが +電源、右下の 7 番ピンが GND になっている。なお、IC により配置が異なる場合もあるので必ず確認すること。

また、論理 IC には複数の論理ゲートが含まれているので、それぞれの入力ピンと出力ピンの対応を確認すること。

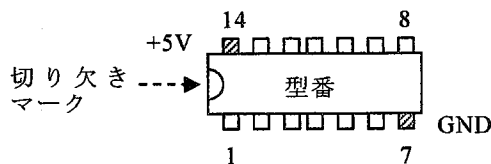


図5 DIP IC のピン配置

5.2 取り付けられている論理 IC の確認

ブレッドボードの中央の溝をまたぐように、いくつかの論理 IC が取り付けられている。必要となる IC は実験内容に応じて変わる。必要な IC がブレッドボード上にない場合は、担当教員もしくは技術職員に申し出ること。論理回路と IC の型番と配線の仕様は p.10 の図 1 6 に記載されている。

5.3 論理 IC と電源・GND の接続

- (1) ジャンパー線を使って、+側の電源端子とブレッドボードのボード A (上側) の赤色の線があるブロックを接続する (図 6 の中の太線のように)。
- (2) ジャンパー線を使って、-側の電源端子とブレッドボードのボード A (下側) の青色の線があるブロックを接続する (図 6 の中の太線のように)。

(注) 多くのブレッドボードは、電源と GND はボード B まで接続されているので、論理 IC を正しい位置に挿入すること。

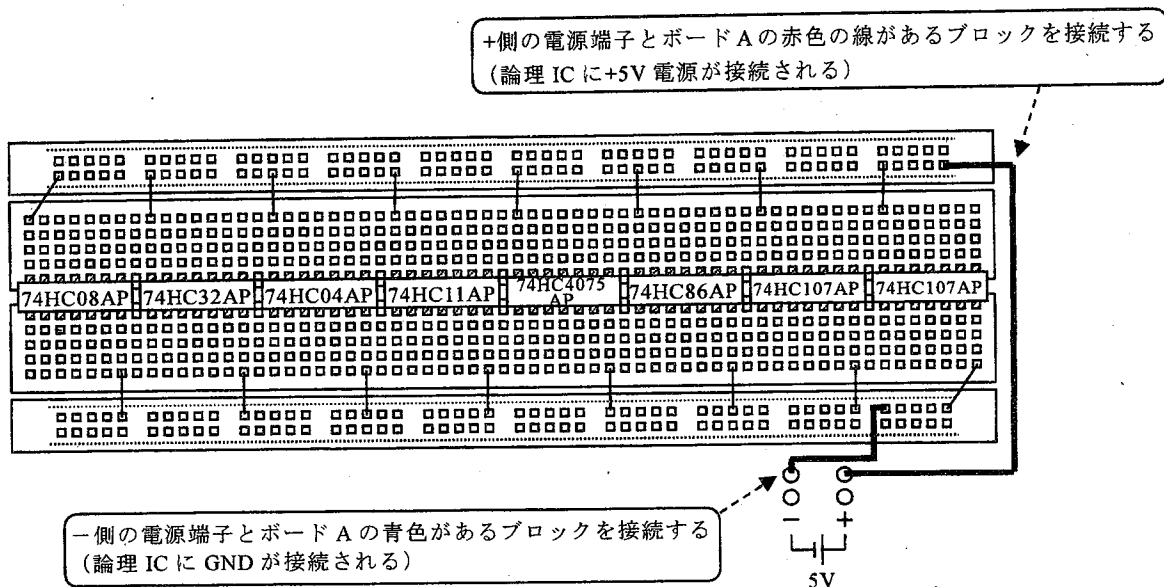


図 6 論理 IC に電源と GND を接続する様子

6. 実験方法

6.1 自己保持回路

自己保持回路は入力によって変化した出力の値を保持する回路であり、記憶を持つ回路である。

〔実験 1〕 自己保持回路の観察

- (1) 図 7 の自己保持回路は 1 ビットの情報を記憶する回路である。
- (2) 順序回路では、回路の動作が複雑になり真理値表だけでは動作を表すことができない。そこで図 7 (b) に示すようなタイムチャートを用いる。
- (3) 図 7 (a) の自己保持回路を作り、図 7 (b) に示すように SW1 を操作して、出力の値が保持されることを確認せよ (動作確認の結果を報告すること)。

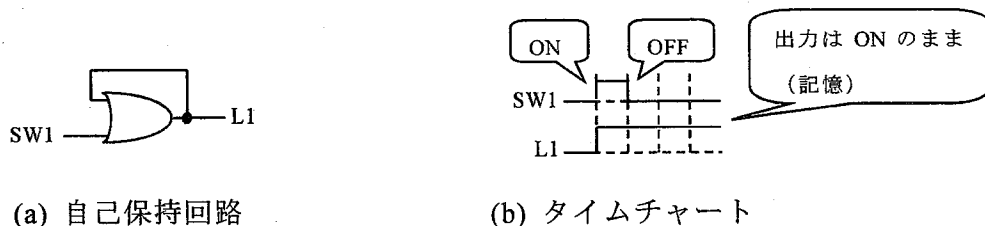
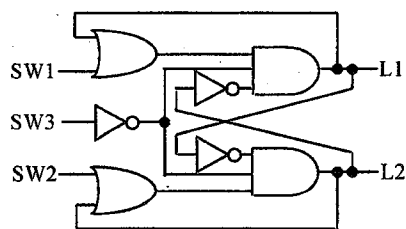


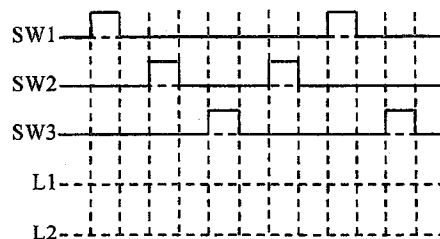
図 7 自己保持回路とタイムチャート

〔実験 2〕 リセットつき自己保持回路の作成

- (1) 図 8 に示す自己保持回路は出力の値を保持する機能とリセット機能を備えている。
- (2) 図 8 (a) の自己保持回路を作り、図 8 (b) に示すように SW1 と SW2 を操作して、L1 の値



(a) 並列優先回路

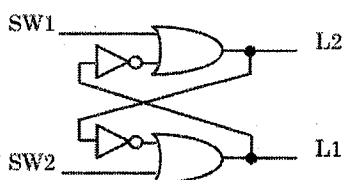


(b) タイムチャート

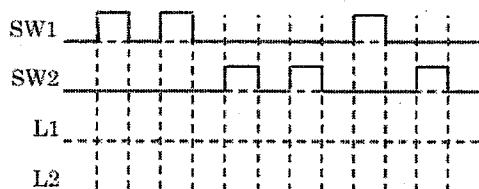
図 1 0 並列優先回路とタイムチャート

〔実験 5〕 新入力優先回路（後から入されたものを優先的に保持）

- (1) 図 1 1 (a)に示す新入力優先回路を作り、動作を確認せよ。入力の値の切り替えにはデータスイッチを使用し、出力の値の変化は発光ダイオードを使用して確認する。
- (2) 図 1 1 (b)に示すタイムチャートのように入力 SW1 と SW2 の値を変化させ、出力 L1 と L2 の値の変化を確認せよ。このときの L1 と L2 の出力も含めたタイムチャートを作成し報告せよ。また、回路の動作についても説明せよ。



(a) 新入力優先回路

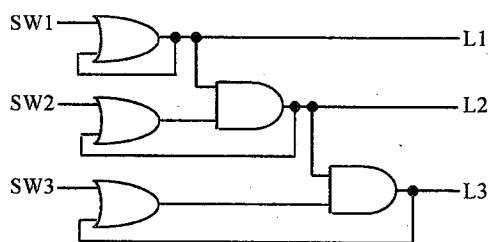


(b) タイムチャート

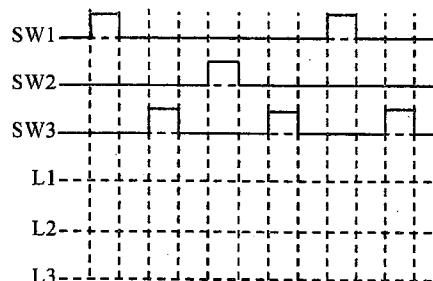
図 1 1 新入力優先回路とタイムチャート

〔実験 6〕 直列優先回路（決められた順序で入力されたものを優先的に保持）

- (1) 図 1 2 (a)に示す直列優先回路を作り、動作を確認せよ。入力の値の切り替えにはデータスイッチを使用し、出力の値の変化は発光ダイオードを使用して確認する。
- (2) 図 1 2 (b)に示すタイムチャートのように入力 SW1、SW2 および SW3 の値を変化させ、出力 L1、L2、および L3 の値の変化を確認せよ。このときの L1、L2、L3 の出力も含めたタイムチャートを作成し報告せよ。また、回路の動作についても説明せよ。



(a) 直列優先回路



(b) タイムチャート

図 1 2 直列優先回路とタイムチャート

〔実験 7〕 早押しクイズの回路

- (1) 3 人の回答者が使用する早押しクイズの回路 (先に入力されたものが優先) を作成せよ。
- (2) 入力は SW1、SW2、SW3、SW4 の 4 つで、SW4 はリセットの入力とする。
- (3) 出力は L1、L2、L3 の 3 つで、それぞれ SW1、SW2、SW3 に対応している。出力の値は発光ダイオードを利用して確認する。
- (4) 作成した回路は図 1 3 のタイムチャートのように動作する。これを確認せよ。
- (5) 完成したら回路図を報告書に記入し報告せよ。また、回路の動作についても説明せよ。

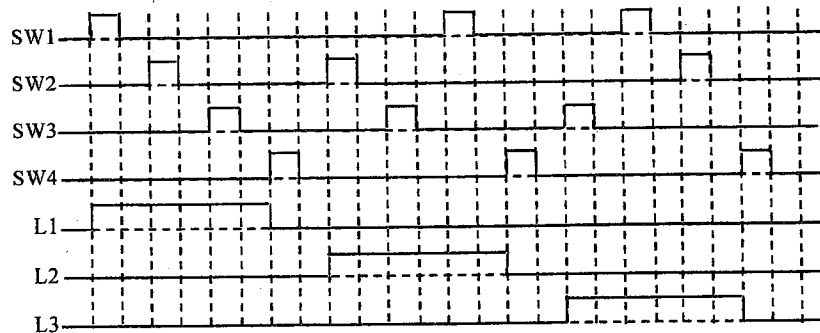


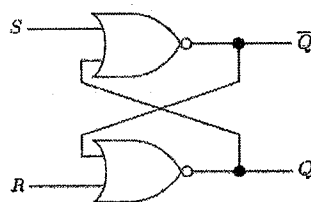
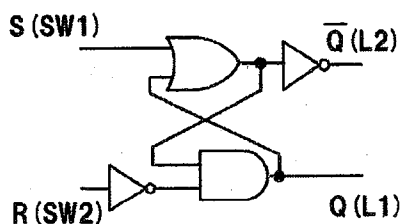
図 1 3 並列優先回路のタイムチャート

〔後片付け〕

- (1) 論理回路トレーナーの電源スイッチを OFF にする。
- (2) 実験で使用したジャンパー線を外してもとの場所 (袋やケース) に収める。
- (3) もともと配線してあった線は取り外さないように注意すること。
- (4) 論理回路トレーナーの電源接続口から AC アダプターを取り外す。
- (5) AC アダプターの電源プラグを電源 (コンセントや OA タップ) から取り外す。

7. 考察

- (1) リセット付き自己保持回路 (図 8) を図 1 4 のように変更すると RS フリップフロップの動作となる。入力と出力の関係を調べ、図 1 5 の RS-FF の入出力表を完成させよ。



R	S	Q	\bar{Q}
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

(1) 回路図

(2) 入出力表

図 1 4 リセット付き自己保持回路

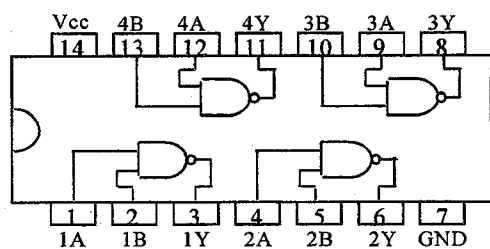
図 1 5 RS-FF

(2) RS フリップフロップでは、 $S=1$, $R=1$ は禁止入力となっている。 $R=1$, $S=1$ が入力されると出力は $Q=0$, $\overline{Q}=0$ となるが、その後同時に $R=0$, $S=0$ に変化すると出力がメタステーブル状態になり、一定時間その状態が続く。そのため Q , \overline{Q} の値が定まらなくなり論理回路の誤動作の原因となる。このメタステーブル状態とは具体的にどのような現象なのか調べ、報告せよ。

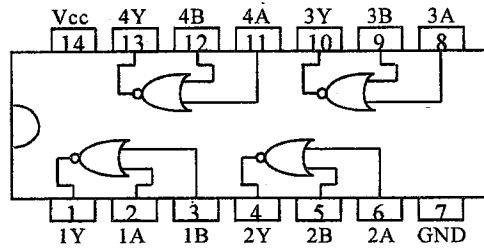
2007.3.31 Tomoya Saito

2015.8.31 Tadashi OKADA

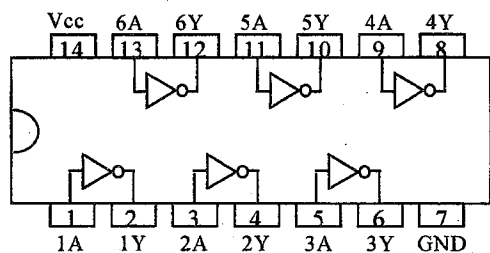
2018.09.04 Masahiro Kawai



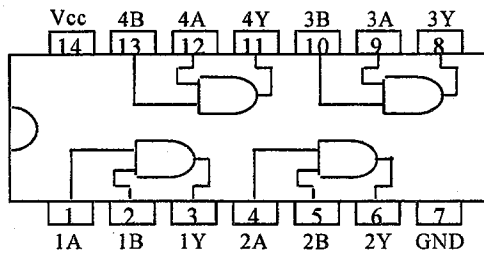
74HC00



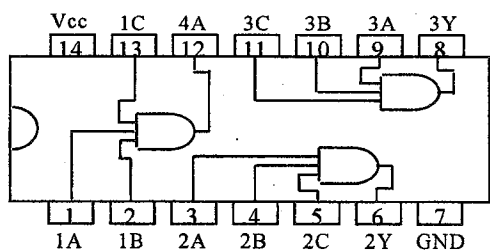
74HC02



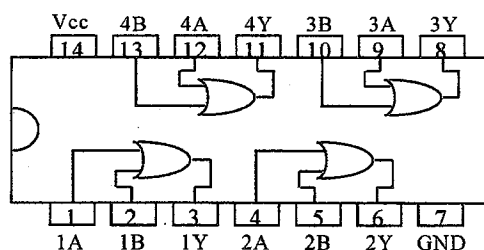
74HC04



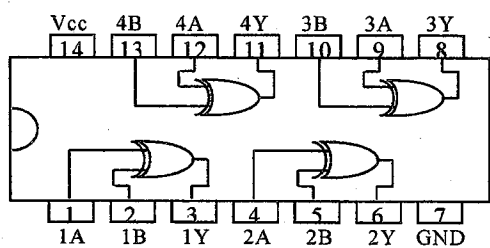
74HC08



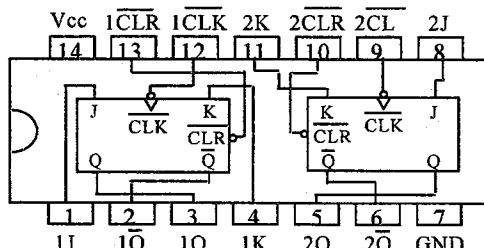
74HC11



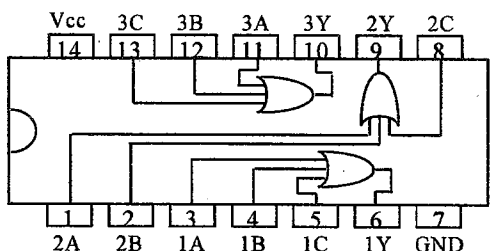
74HC32



74HC86



74HC107



74HC4075

図 1 6 論理 IC の種類とピン配置

順序回路（２）

1. 目的

代表的な順序回路であるフリップフロップの動作原理について理解を深めるとともに、これを組み合わせたカウンタ回路やシフトレジスタについて学習する。

2. 実験内容

論理回路トレーナーを使用してフリップフロップ、カウンタ回路、シフトレジスタの製作と動作確認を行う。

[使用器具]

論理回路トレーナー、ACアダプター、論理IC、ジャンパー線

3. 論理回路トレーナーの準備

順序回路（１）の実験と同様に、論理回路トレーナー（図１）を使用してフリップフロップ、カウンタ回路、シフトレジスタを制作する。入力データの切り替え（0か1か）には、データスイッチを使用する。出力内容の確認には、発光ダイオードを使用する。論理回路とICの型番と配線の仕様は実験テキスト p.7 の図15に記載されている。

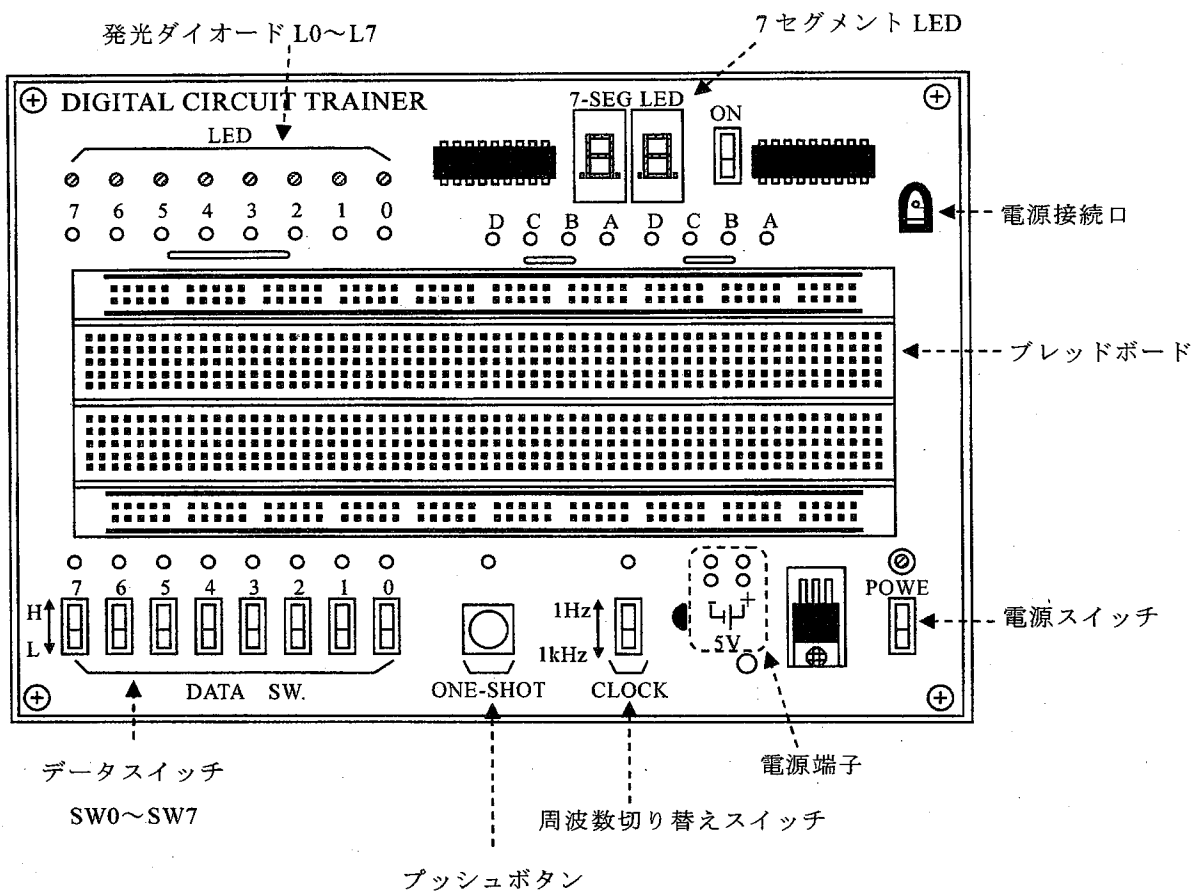


図1 論理回路トレーナーの外観図

4. 実験方法

4.1 フリップフロップ

フリップフロップは回路の状態（情報）を記憶する回路であり、RS フリップフロップ、D フリップフロップ、JK フリップフロップ、T フリップフロップなどがある。

〔実験 1〕 D フリップフロップの作成

- (1) 論理回路トレーナーとジャンパー線を使用して、図 2 に示す D フリップフロップ回路を作成せよ。
- (2) 図 3 のタイムチャートのように SW1、SW2 を操作して L1、L2 の変化を記入し、D フリップフロップのタイムチャートを完成させ、報告せよ。

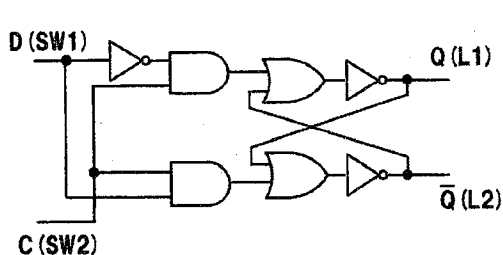


図 2 D フリップフロップ

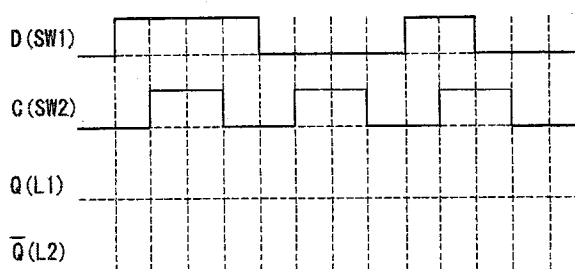


図 3 D フリップフロップのタイムチャート

〔実験 2〕 JK フリップフロップの動作

- (1) 論理回路トレーナーとジャンパー線を使用して、図 4 に示す JK フリップフロップ回路を作成せよ。
- (2) 図 5 のタイムチャートに示すように SW1、SW2、SW3 を操作して L1 と L2 の変化を記入し、JK フリップフロップのタイムチャートを完成させ、報告せよ。

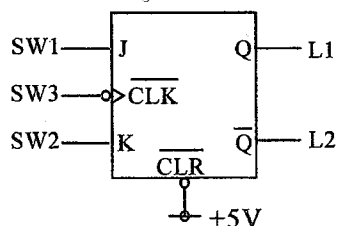


図 4 JK フリップフロップ

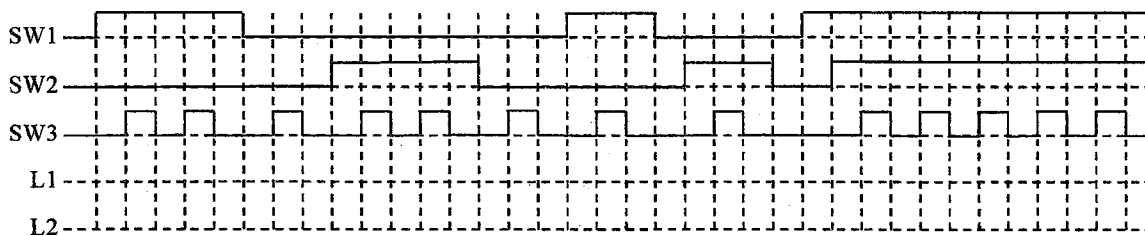


図 5 JK フリップフロップのタイムチャート

4.2 カウンタ回路

カウンタ回路とは、入力が行われた回数（すなわち入力端子の ON/OFF が切り替わった回数。カウント値という）を記憶し、出力する回路である。一般的な 2 進カウンタでは、2 進数でカウント値を出力する。 n ビットの 2 進カウンタは n 本の出力端子を持ち、 $0 \sim 2^n - 1$ までのカウント値を記憶・出力することができる。一方、8 進カウンタや 10 進カウンタでは、カウント値が 7 あるいは 9 を超えると 0 に戻る。

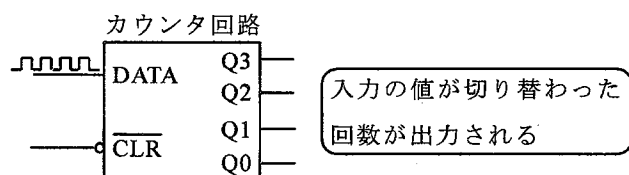


図6 カウンタ回路

カウンタ回路は計算機のさまざまな箇所で利用されている。例えば、入力端子に 1 秒おきにパルス信号を入力すると、カウント値は秒数を示すようになり、時計に応用することができる。また、入力端子と赤外線センサを接続すると、センサが反応した回数を出力するようになるので、入場者数や車の台数を計測する装置にも応用できる。

〔実験3〕2ビット2進カウンタの作成

- (1) 論理回路トレーナーとジャンパー線を使用して、図7に示すカウンタ回路を作成せよ。
- (2) 図8のタイムチャートに示すように SW1 と SW2 を操作して L0、L1 の変化を記入し、タイムチャートを完成させ、報告せよ。

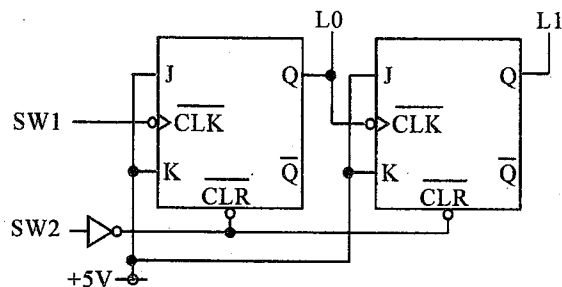


図7 2ビット2進カウンタ回路

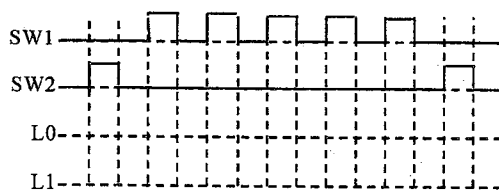


図8 2ビット2進カウンタ回路のタイムチャート

〔実験4〕4ビット2進カウンタの作成

- (1) 論理回路トレーナーとジャンパー線を使用して、図9に示すカウンタ回路を作成せよ。
- (2) 図10のタイムチャートに示すように SW1 と SW2 を操作して、L0、L1、L2、L3 の変化を記入し、タイムチャートを完成させ、報告せよ。

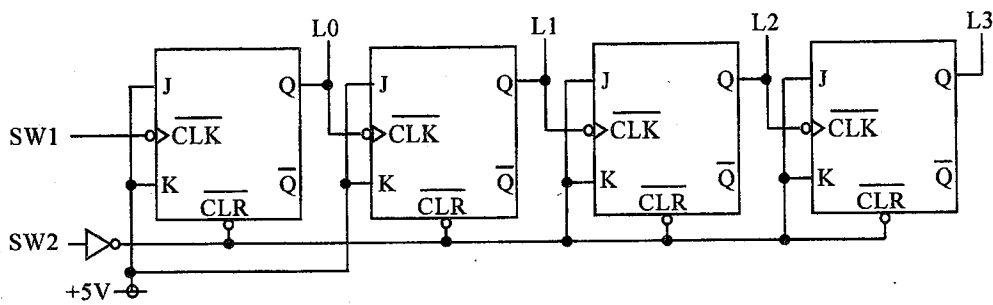


図 9 4ビット2進カウンタ回路

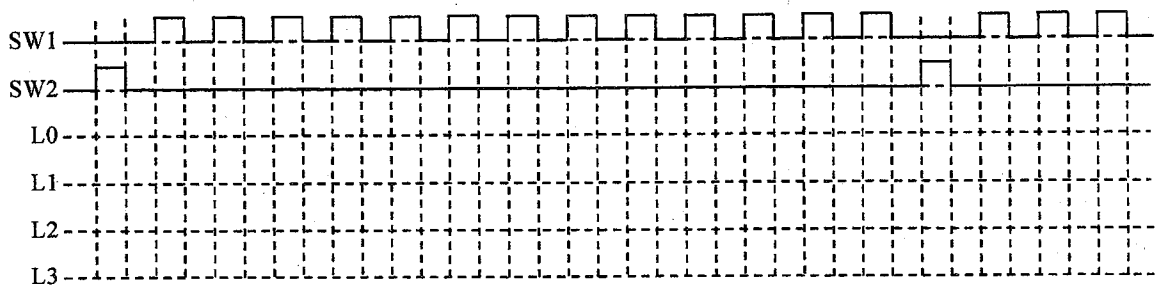


図 10 4ビット2進カウンタのタイムチャート

〔実験4〕7セグメントLEDによる16進数表示

- (1) 図9に示す4ビット2進カウンタ回路のL0の端子を7セグメントLEDのA端子に接続する。
- (2) L1の端子を7セグメントLEDのB端子に接続する。
- (3) L2の端子を7セグメントLEDのC端子に接続する。
- (4) L3の端子を7セグメントLEDのD端子に接続する。
- (5) 7セグメントLEDの右側にあるスライドスイッチをON側（上側）にする。
- (6) データスイッチを操作して、カウント値が7セグメントLEDに16進数表記で表示されることを確認せよ（動作確認の結果を報告すること）。

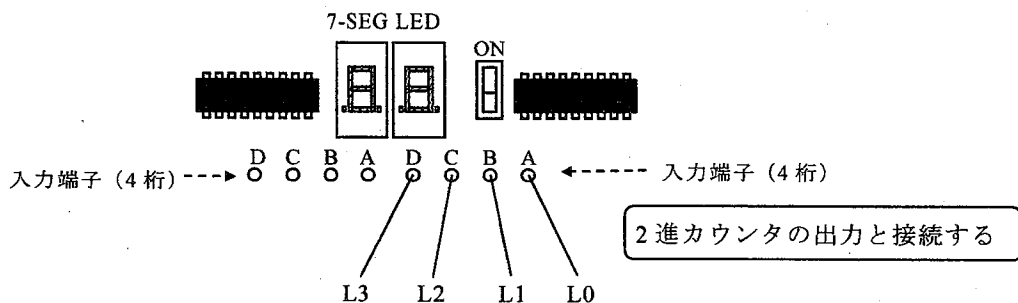


図 11 7セグメントLEDの確認

4.3 シフトレジスタ

シフトレジスタとは、入力されたデータがある程度の時間（クロック数）が経過すると出力される回路である。一般にシフトレジスタの IC は遅れ時間（クロック数）の異なるいくつかの出力端子を持つ。図 1 2 に示したシフトレジスタは 4 つの出力を持つ。入力の値が変化すると、1 クロックだけ遅れて Q1 に出力され、2 クロックだけ遅れて Q2 に出力される。

シフトレジスタは計算機の中では処理速度の速い回路が、遅い回路の処理を待って、タイミングを合わせるときに利用される。また、1 秒遅れでランプを点灯させ、2 秒遅れで音楽を鳴らすなど、一般的なタイマとしても利用できる。

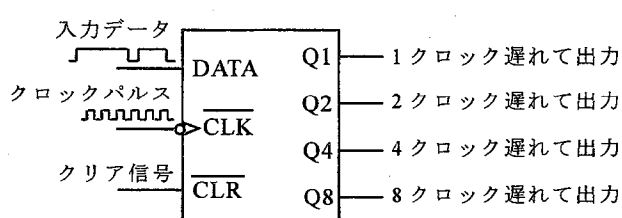


図 1 2 シフトレジスタ回路

〔実験 5〕 4 ビットシフトレジスタの作成

- (1) 論理回路トレーナーとジャンパー線を使用して、図 1 3 に示す 4 ビットシフトレジスタ回路を作成せよ。
- (2) 図 1 4 のタイムチャートに示すように SW1、SW2、SW3 を操作して L0、L1、L2、L3 の変化を記入し、タイムチャートを完成させ、報告せよ。

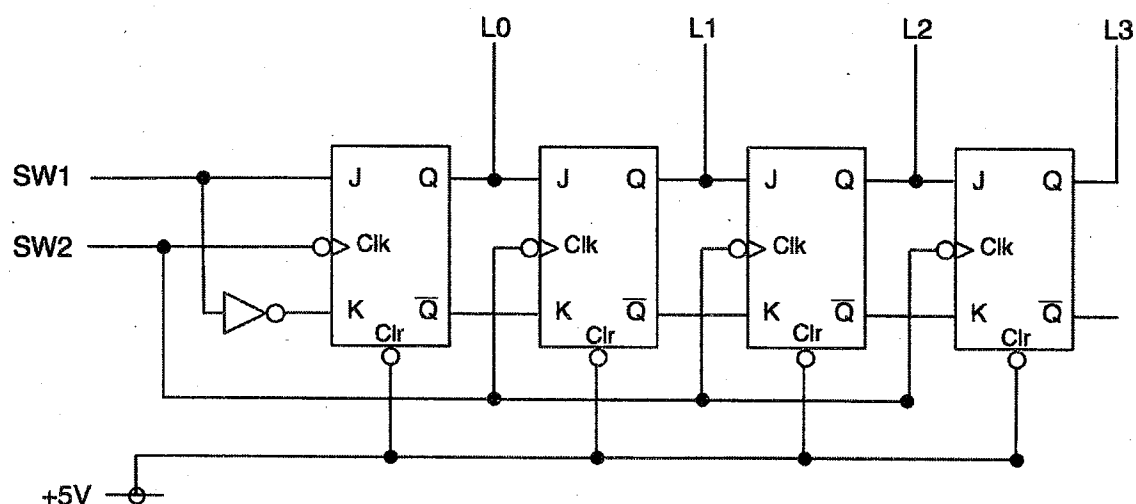


図 1 3 4 ビットシフトレジスタ
clkにバーが必要

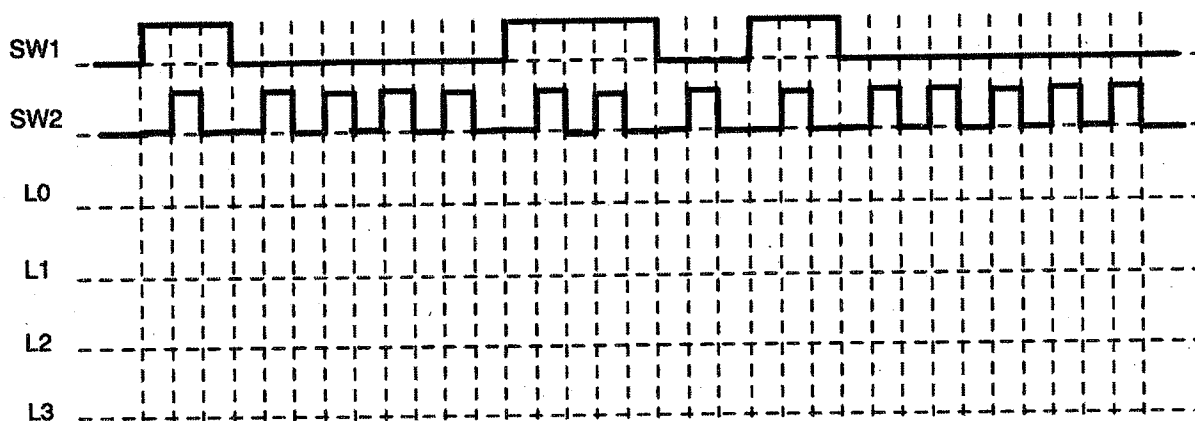


図 1 4 4 ビットシフトレジスタのタイムチャート

〔後片付け〕

- (1) 論理回路トレーナーの電源スイッチを OFF にする。
- (2) 実験で使用したジャンパー線を外してもとの場所（袋やケース）に収める。
- (3) もともと配線してあった線は取り外さないように注意すること。
- (4) 論理回路トレーナーの電源接続口から AC アダプターを取り外す。
- (5) AC アダプターの電源プラグを電源（コンセントや OA タップ）から取り外す。

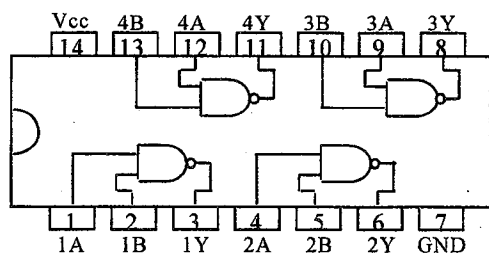
5. 考察

- (1) JK フリップフロップを AND、OR、NOT で構成する場合の回路例を調べ、報告せよ。
- (2) JK フリップフロップのタイムチャート（完成した図 5 のタイムチャート）より、SW3（CLK）が ON となるとき SW1（J）、SW2（K）の入力と、Q（L1）の出力の関係を表にまとめ、報告せよ。
- (3) シフトレジスタを使った応用例としてリングカウンタがある。どのような回路か調べ、その特徴について報告せよ。

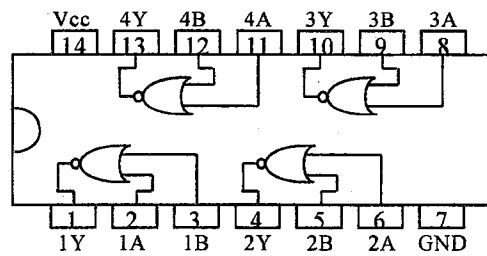
2007.3.31 Tomoya Saito

2015.8.31 Tadashi OKADA

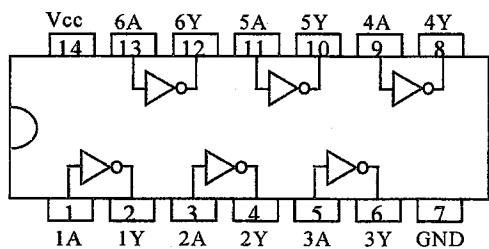
2018.09.06 Masahiro Kawai



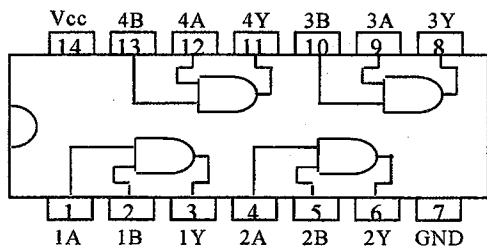
74HC00



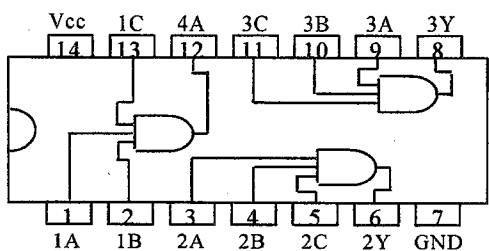
74HC02



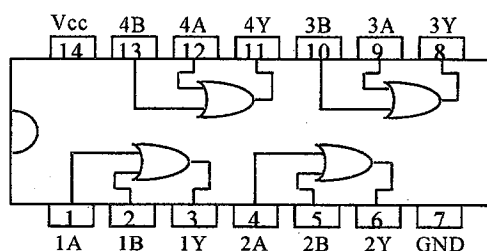
74HC04



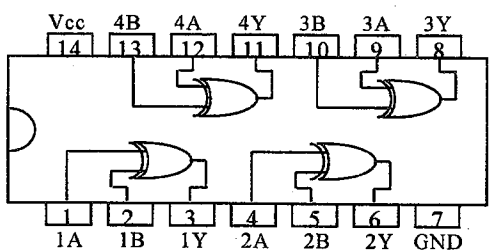
74HC08



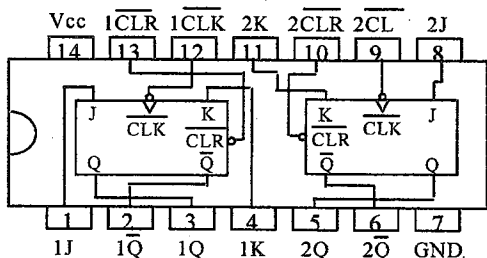
74HC11



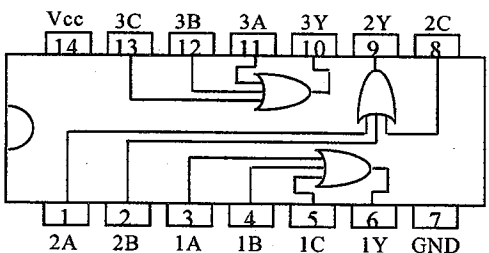
74HC32



74HC86



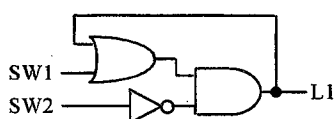
74HC107



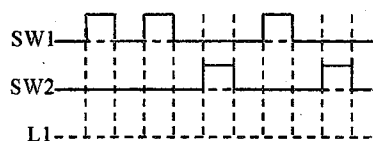
74HC4075

図 1 5 論理 IC の種類とピン配置

の変化を確認せよ。このときの L1 の出力を含めたタイムチャートを作成し報告せよ。
また、回路の動作についても説明せよ。



(a) リセットつき自己保持回路



(b) タイムチャート

図 8 リセットつき自己保持回路とタイムチャート

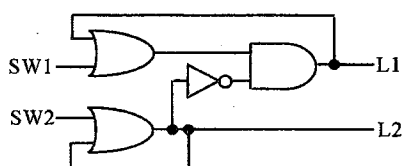
6.2 インターロック回路

優先度の高い方の回路を動作させると他の回路が動作しなくなるようにすることを、インターロックをかけるといい、このような回路をインターロック回路と呼ぶ。

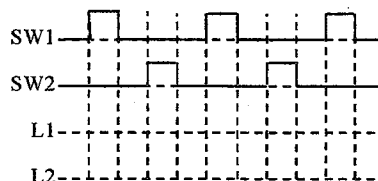
〔実験 3〕 インターロック回路の作成

- (1) 図 9 に示す回路は 2 系統の自己保持回路の間に優先度の区別を設けたものである。
- (2) 図 9 (a) のインターロック回路を作り、動作を確認せよ。入力の値の切り替えにはデータスイッチを使用し、出力の値の変化は発光ダイオードを使用して確認する。
- (3) 図 9 (b) に示すタイムチャートのように入力 SW1 と SW2 の値を変化させ、出力 L1 と L2 の値の変化を確認せよ。このときの L1 と L2 の出力も含めたタイムチャートを作成し報告せよ。また、回路の動作についても説明せよ。

(注) インターロックされた状態になっていることがあるので、その場合は L2 を初期化 (SW2 側の OR ゲートもう一方の入力を GND に接触) する。



(a) インターロック回路



(b) タイムチャート

図 9 インターロック回路とタイムチャート

6.3 優先回路

回路の動作に優先順位を持たせた回路である。

〔実験 4〕 並列優先回路 (先に入力されたものを優先的に保持)

- (1) 図 10 (a) に示す並列優先回路を作り、動作を確認せよ。入力の値の切り替えにはデータスイッチを使用し、出力の値の変化は発光ダイオードを使用して確認する。
- (2) 図 10 (b) に示すタイムチャートのように入力 SW1、SW2 および SW3 の値を変化させ、出力 L1 と L2 の値の変化を確認せよ。このときの L1 と L2 の出力も含めたタイムチャートを作成し報告せよ。また、回路の動作についても説明せよ。