

基礎エレクトロニクス

Basic Electronics

提出者：08A17153 羽田充宏

実験実施日：2019年5月13日

実験実施日：2019年5月17日

実験実施日：2019年5月20日

実験実施日：2019年5月24日

実験実施日：2019年5月27日

実験実施日：2019年5月31日

Introduction

この実験では電気回路の取り扱いや考え方について学ぶ。電気回路を応用物理学実験として学ぶ理由には以下のことが挙げられる。

- 物理学実験において電気回路は重要な役割を果たし、システムの安定性判定や信号増幅の際に必要となるため。
- 電気回路を通して様々な物理法則に触れることができる。
- 電気回路の中に用いられている半導体は物性物理学のもっとも偉大な発明の一つであり、電気回路を製作する中でどのように半導体が働くかを確認することができる。
- デジタル回路はコンピューターアーキテクチャの根幹であるので回路を理解するととはコンピュータテクノロジーを理解することに通じるため。

1 Characteristics of NOT gates (1st day)

- Digital multimeters
- Clip test leads

1.1 Purpose

異なる IC による論理ゲートの挙動を実験する。また与えられた電気回路を計画的に製作し、NOT ゲートの入出力電圧を計測する。

1.2 Equipment

- NOT gate IC(74LS04,74HC04,74HC14)
- Universal printed circuit board ICB-86
- Switching power supply with a connector
- Connector for power supply
- Trimming potentiometer 1k Ω
- 14pin IC socket
- 8 pin IC socket
- Ceramic capacitor 0.1 μ

1.3 Procedure

今回は半田付けによって論理回路を実装していく。NOT ゲート回路を図1のように作る。まず、スイッチング電源からの 5V,GND は 8 ピンソケットを使って基盤中央の縦のラインに給電する。可変抵抗を基盤に取り付け、ジャンパー線と半田によって回路を作っていく。今回は一つの NOT ゲートのみ使えば良いので 1,2 番ピンのゲートを使えるように 14 ピン IC ソケットを配線する。また使わないゲートの入力端子は GND または 5V に接続し、出力端子は解放する。次に電源と接続し可変抵抗により入力電圧が 0 5V の間で変化するか確認する。確認できたら電源を外し、周辺回路への電源電圧の変動の影響や磁気ノイズを減らすために電源と GND の間にセラミックコンデンサー (0.1 μ) を接続する。回路が完成したらそれぞれの IC をソケット

に取り付けテスターを接続し入力電源と出力電源を測定する。

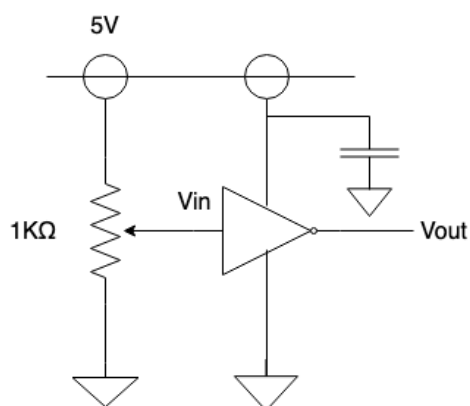


図 1: NOT ゲート回路

1.4 Result

図 2, 図 3, 図 4, 図 5 は実験より得られた V_{in} , V_{out} の関係をグラフにしたものである。全ての IC において入力電圧 (V_{in}) が 5V 付近では出力電圧 (V_{out}) は 0V を示し、入力電圧 (V_{in}) が 0V 付近では出力電圧 (V_{out}) は 5V を示した。また IC によって V_{in} を下げていった際の V_{out} の電圧の上がり方の鋭さが違っていった。74LS04, 74HC04, 74HC14 の順で出力電圧の上がり方は鋭くなっていった。また 74HC14 に関しては V_{in} を上げていく場合と下げていく場合で異なる動作をした。 V_{in} を下げていった場合では 2V を境として V_{out} が 5V 付近を示したが、 V_{in} を上げていった場合は 3V を境として V_{out} が 0V となった。

1.5 Discussion

今回はどの IC についても入力電圧が 5V 付近の時出力電圧は 0V 付近を示し、逆に入力電圧

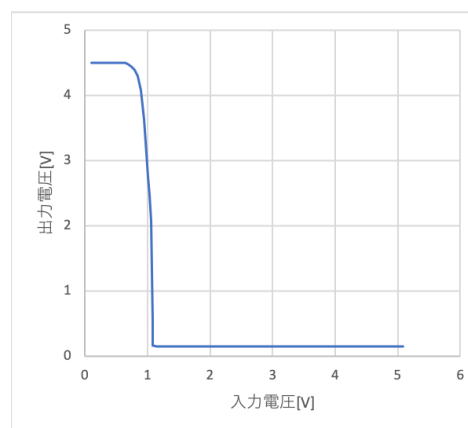


図 2: 74LS04

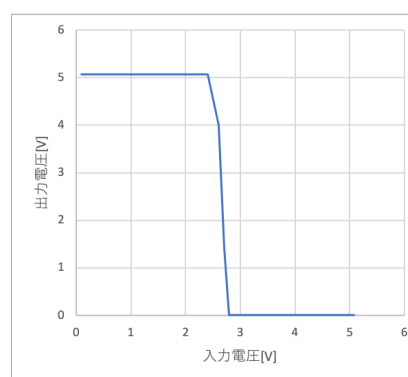


図 3: 74HC04

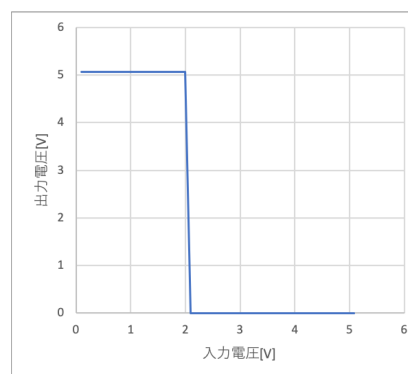


図 4: 74HC14(V_{in} 下げていく)

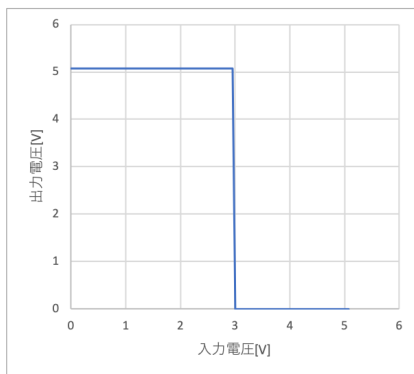


図 5: 74HC14(V_{in} 上げていく)

が 0 付近の時出力電圧は 5V 付近を示したので NOT ゲートが正しく機能したと推測できる。

また TTL における NOT ゲートの動作を考察する。

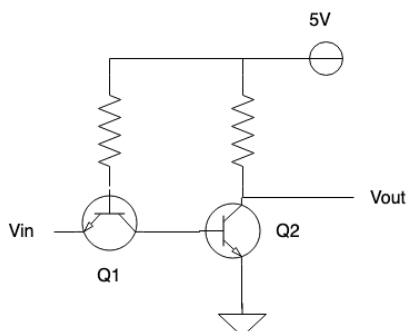


図 6: TTL NOTgate

TTL における NOT ゲートは図 6 のように表せる。この回路において入力電圧 V_{in} が 0V の時トランジスタ Q1 においてベースエミッタ電圧 V_{BE} はスイッチング電圧である 0.6V を超えるため Q1 は作動する。この時 Q2 において V_{BE} は 0V となるため Q2 は作動せず抵抗による電圧降下が起こらないため出力電圧が 5V となると考えられる。

一方、入力電圧 V_{in} が 5V 付近の時 Q1 において V_{BE} は逆バイアスとなりベースエミッタ間に

は電流は流れなくなる。この時ベースコレクタ間に電流が流れることとなりトランジスタ Q2 は作動し抵抗により電圧降下を起こすこととなる。したがって V_{out} は 0V を示すと考えられる。

次に CMOS における NOT ゲートの動作を考察する。

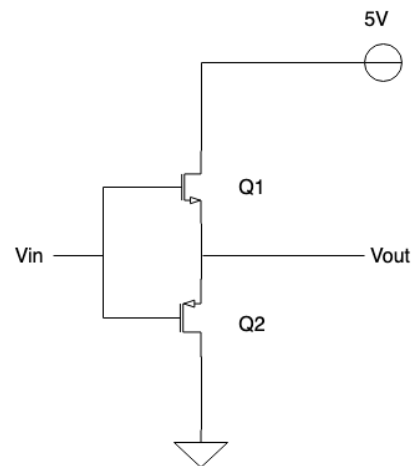


図 7: TTL NOTgate

図 7 の CMOS 回路では p チャネル型 (Q1) と n チャネル型 (Q2) の二つの MOSFET を組み合わせて作られている。それぞれ入力電圧 V_{in} が 0V 付近の時は Q1 がオンとなり出力電圧 V_{out} は 5V となり、入力電圧 V_{in} が 5V 付近の時 Q2 がオンとなり出力電圧 V_{out} は 0V 付近になることが予想される。

以上の考察から 74LS04 を用いた回路が他の三つの IC を用いた回路よりも入出力電圧のグラフが緩やかであったのはトランジスタにおいてスイッチング電圧を境目として完全に電流が流れる流れないの関係が成り立つのではなく、スイッチング電圧の付近で少しずつ電流が流れ始めるためであると予想できる。

また CMOS 回路においては回路内部で入力電圧によって選択的にスイッチのように on,off のように作動するのでトランジスタを用いた TTL

回路に比べて鋭い入出力電圧のグラフが得られたと考えられる。

2 Multibibrator and LED indicator (*2nd day*)

2.0.1 Purpose

単純な電気回路を製作しその動作についてオシロスコープを用いて調べる．具体的にはシュミットトリガーで NOT ゲートを用いて発振器，LED インジケータを作り，発振器の出力を可視化する．

2.1 Equipment

- 実験 1 と同様のもの
- Bread board
- Oscilloscope and two probes
- Resistors ($1\text{K}\Omega, 10\text{K}\Omega, 100\text{K}\Omega$)
- Ceramic capacitor ($0.1\mu\text{F}$)
- Aluminum electrolytic capacitor ($1\mu\text{F}, 10\mu\text{F}$)
- Transistor 2SC1815(GR)
- LED (OSDR3113A)

2.1.1 Procedure

今回の実験以降はブレッドボードによって電気回路を実装していく．図 8 のように発振器の電気回路を制作する．multibibrator を作ったらオシロスコープを用いて V_{in}, V_{out} の値を同時に表示させる．その後波形を USB に保存する．今回は抵抗の値 (R_f) を $1\text{K}\Omega, 10\text{K}\Omega, 100\text{K}\Omega$ ，コンデンサの容量 (C_f) をそれぞれ $1\mu\text{F}, 10\mu\text{F}$ と変化させて測定する．抵抗，コンデンサの容量をそれぞれ変化させた際の周期の違いを計測する．

次に図9に示すようなLEDインジケータの電気回路を制作する．電気回路が動作するかを確認するために V_{in} を5V線につなぎLEDが点灯するか確認する．その後電圧計により V_1, V_2, V_3 の値を計測し，エミッタ電流が20mA以下となっていることを確認する．発振器回路の出力電圧をLEDインジケータの入力電圧に接続し発振器の出力をLEDを用いて可視化する．その後LEDの点灯の様子を観察する．

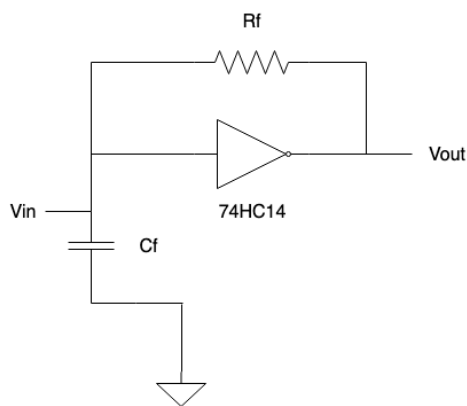


図 8: multibibrator

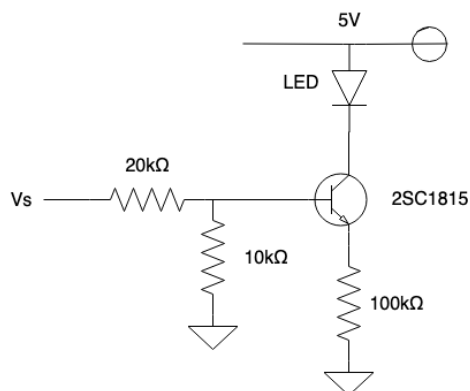


図 9: LED indicator

2.1.2 Result

測定の結果オシロスコープで観察された波形は図10,11のようになった．またこれ以外の波形に関しては機材の不調によりデータを取れなかったため実験ノートよりそれぞれの場合の周期について表1にまとめた．また全ての C_f, R_f において入力電圧は三角波，出力電圧は矩形波となった．

次にこの回路によって生成された出力電圧をLEDインジゲータの入力電圧としてLEDの光る様子を観察したところ $C_f = 1\mu F, R_f = 1K\Omega$ の時は常に点灯しているように見えた． $C_f = 1\mu F, R_f = 10K\Omega, C_f = 10\mu F, R_f = 1K\Omega$ の時は高速で点滅しているように見えた． $C_f = 1\mu F, R_f = 100K\Omega, C_f = 10\mu F, R_f = 10K\Omega$ の時は比較的遅い点滅であった． $C_f = 10\mu F, R_f = 100K\Omega$ の時はかなり遅く目視で回数が数えられるほどであった．

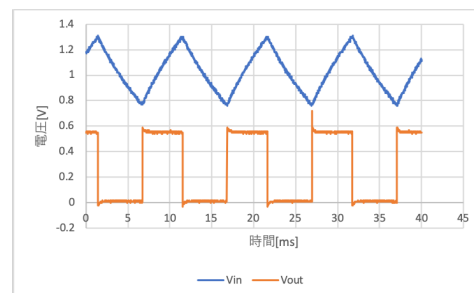


図 10: $R_f = 10k\Omega, C_f = 1\mu F$

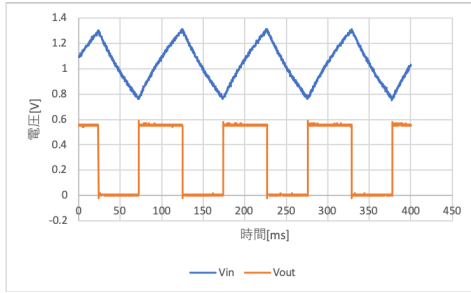


図 11: $R_f = 100k\Omega, C_f = 1\mu F$

表 1: C_f, R_f における V_{in}, V_{out} の周期 [ms]

	$1K\Omega$	$10K\Omega$	$100K\Omega$
$1\mu F$	1	10	100
$10\mu F$	10	100	1000

2.1.3 Discussion

まず実験の結果より発振器の生成する矩形波の周波数は

$$f = C_f \times R_f$$

によって与えられると考えられる。次に入力電圧が三角波、出力電圧が矩形波となる理由について考察する。まず、CMOS の NOT ゲートである 74HC14 には前回の実験結果よりヒステリシス特性があり V_{in} が上がっていく際には 3V 付近に閾値が存在し、 V_{in} が下がっていく際には 2V 付近に閾値が存在するという特性があった。この時の電圧をそれぞれ V_T^+, V_T^- と名前をつけることとする。

最初に図 8 において初期状態では C_f には電荷は溜まってないので V_{in} は上昇していくと考えられる。この時 NOT ゲートが作動しており V_{out} の値は正の値をとる。その後コンデンサの電圧が上がり NOT ゲートにかかる電圧が上がり V_T^+

に達すると V_{out} の値は 0 となり、それと同時にコンデンサは充電状態から放電状態へと移行し V_{in} の値は緩やかに減少していくと予想できる。以上のことから V_{in} は三角波となり、 V_{out} は矩形波となることが推測できる。

次に LED インジゲータについて考察する。まず、LED が点灯する理由についてはマルチバイブレーターにより生成された矩形波が周期的に正の電圧と 0V の状態繰り返すため、図 9 に示されるトランジスタ (2SC1815) において、マルチバイブレーターから正の電圧が入力される際はベースエミッタ間の電圧が 0.6 を超えるためトランジスタが作動し結果的に LED に電流が流れ光るが、一方でマルチバイブレーターから 0V の入力を受け取る際は図 9 のトランジスタが作動せず LED が点灯しないということが推測される。

次に具体的なケースに分けて考察する。まず、 $C_f = 1\mu F, R_f = 1K\Omega$ の時常に LED が点灯していたように見えたのはこの時の矩形波の周波数は表 1 より逆数をとって $f=1000\text{Hz}$ となっており 1 秒間に 1000 回点滅している計算となるが非常に高速に点滅していたために点灯し続けていたように見えたのだと考えられる。

以下同様に考えると $C_f = 1\mu F, R_f = 10K\Omega, C_f = 10\mu F, R_f = 1K\Omega$ の時は 100Hz となり点滅が目視可能であると考えられ、結果と矛盾しないと考えられる。

また抵抗とコンデンサの値を変えても一般に $C_f \times R_f$ の値が大きくなるにつれて点滅する周期は徐々に小さくなっていくと考えられる。

3 Inverting and non-inverting amplifiers (*3rd day*)

3.0.1 Purpose

実際の増幅器の基礎的な動作を理解するために，反転増幅回路，非反転増幅回路を製作し，それらの直流電流特性を調べる．

3.1 Equipment

- 実験 2 と同様のもの

3.1.1 Procedure

まず反転増幅回路を図 12 のように作る．今回の実験ではまず抵抗の値を $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ とする．また DC-DC コンバーターを用いてオペアンプの電源としてパワーライン (+15V, -15V) を作る．この際パワーラインと GND の間に $0.1\mu F$ のコンデンサを挟むことを確認する．回路を作った後入出力特性を電圧計を用いて計測する．その後抵抗の値を $R_1 = 200k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ として再び入出力電圧を測定しどのように動作が変わるのかを観察する．

次に図 13 に示すように反転増幅回路を作る．まずは抵抗の値を $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ とする．その後先ほどの実験と同様に入出力電圧を測定した．次に $R_1 = 200k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ として再び入出力電圧を測定する．

計測が終了した後それぞれの抵抗値の場合について入力電圧，出力電圧の関係をグラフにプロットして動作の違いや増幅率について調べる．

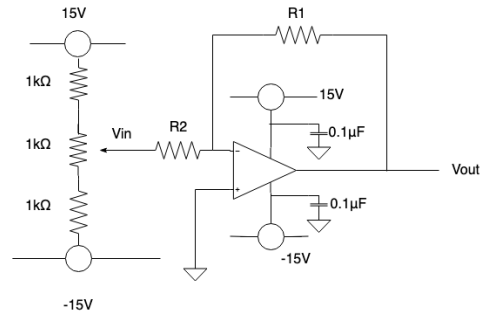


図 12: 反転増幅回路

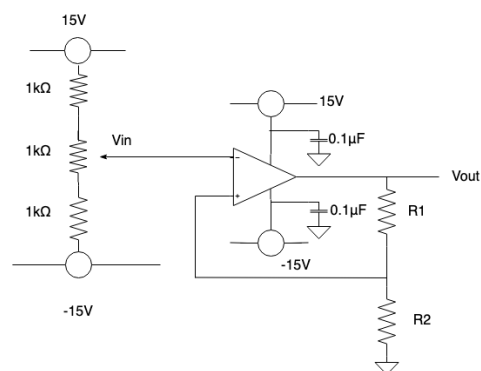


図 13: 非反転増幅回路

3.1.2 Result

測定結果よりグラフに描画したところ図 14, 図 15, 図 16, 図 17 のようなグラフが得られた. また増幅後の出力電圧が 13.5V を超え始めたあたりから増幅されずそれ以降は出力電圧が一定値をとるようになった.

さらにこれらの一定値を除いた測定値を用いてそれぞれのグラフにおいて最小二乗法を用いて傾きを求め, 増幅率を求めた結果を以下に示す.

図 14 $R_1 = 100k\Omega, R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = -10.046$$

図 15 $R_1 = 200k\Omega, R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = -20.248$$

図 16 $R_1 = 100k\Omega, R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = 11.035$$

図 14 $R_1 = 50k\Omega, R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = 6.0141$$

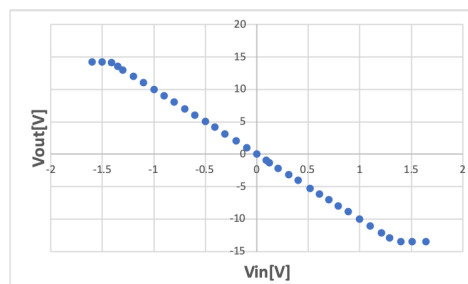


図 14: 反転増幅回路 ($R_1 = 100k\Omega, R_2 = 10k\Omega$)

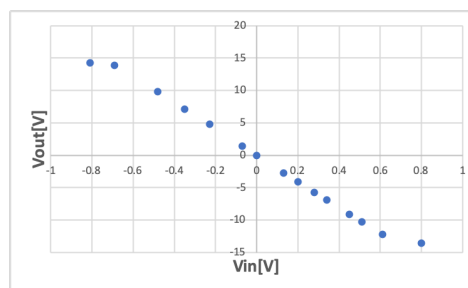


図 15: 反転増幅回路 ($R_1 = 200k\Omega, R_2 = 10k\Omega$)

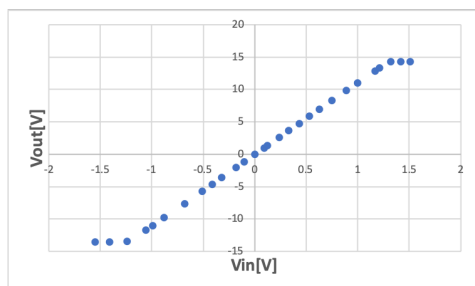


図 16: 非反転増幅回路 ($R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$)

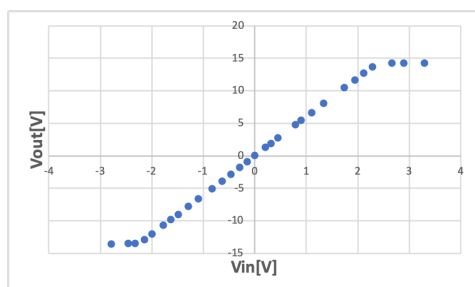


図 17: 非反転増幅回路 ($R_1 = 50k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$)

3.1.3 Discussion

まず出力電圧が 13V 付近を境に一定値となっていた原因としては今回使用したオペアンプは $\pm 15V$ を電源として作動しているのでその電源電圧以上に増幅させることができないためだと考えられる。

また、なぜ非反転増幅回路、反転増幅回路がオペアンプにより実現できるのかについて考察する。まず理想オペアンプとは

- (性質 1) 入力端子のインピーダンスが無限大であり、入力端子には電流が流れない。
- (性質 2) 出力インピーダンスが 0 であり、出力電圧は出力電流に依存しない。

- (性質 3) 電圧増幅率が無限大であり、オペアンプの入力電圧を V_+ , V_- とすると V_{out} が有限値をとる時 $V_+ = V_-$ の関係が成り立つ。

以上 3 つの特性をもつ。この事実と図 12, 図 13 の回路においてキルヒホッフの法則を使うと、反転増幅回路の増幅率は次のように与えられる

$$V_{out} = -\frac{R_1}{R_2} V_{in} \quad (1)$$

非反転増幅回路の増幅率は次のように与えられる

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{in} \quad (2)$$

この式に図 14, 図 15, 図 16, 図 17 の場合における抵抗の値を代入して増幅率を求めると、

図 14 $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = -10$$

図 15 $R_1 = 200k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = -20$$

図 16 $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = 11$$

図 17 $R_1 = 50k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ の時

$$V_{out}/V_{in} = 6$$

となり概ね実験値と一致することが確かめられた。図 15 $R_1 = 200k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ の値が実験値と理論値で一番大きな開きが生じてしまった理由としては、 $200k\Omega$ の抵抗がなかったために $100k\Omega$ の抵抗 2 個を直列につなぎ代用したために抵抗値に若干のズレが生じてしまったことなどが考えられる。

またこれらの増幅器の応用例としては、入力として与えられた微弱な入力信号を増幅して取り出すことなどが挙げられる。

4 Frequency filters based on operational ampli- fiers (4th & 5th day)

4.0.1 Purpose

増幅器を使い low-pass filter, high-pass filter 作り, それを用いて周波数時間特性を調べる.

4.1 Equipment

- 実験 3 と同様のもの

4.1.1 Procedure

まず図 18 に示すように Low-pass-filter を作る. この時オペアンプのパワーラインと GND に前回同様 $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサを挟むことを確認する. 今回の実験ではファンクションジェネレーターを用いて矩形波, 正弦波を作る. まず V_{in} にファンクションジェネレーターを用いて矩形波を入力とし, 10Hz から 10KHz まで 10 倍ずつ変化させながら測定した. この時オシロスコープを用いて矩形波の入力電圧と出力電圧を同時に表示して観察した. またこの時のデータを USB に保存した. 次に正弦波を同様の手順で測定し記録した.

次に図 19 に示すように High-pass-filter を作り, 前回同様ファンクションジェネレーターにより矩形波の入力電圧と出力電圧の関係を測定し, 次に正弦波の入力電圧と出力電圧の関係を測定した.

最後に図 20 に示すように Band-pass-filter を作り, 前回同様に矩形波, 正弦波の入力電圧においてそれぞれ周波数を変えながら測定を行った.

これらの実験から得られた結果を対数グラフにプロットすることによって周波数と振幅の関係

について調べる. また出力電圧の波形と入力電圧の波形を見比べてその位相差について調べる.

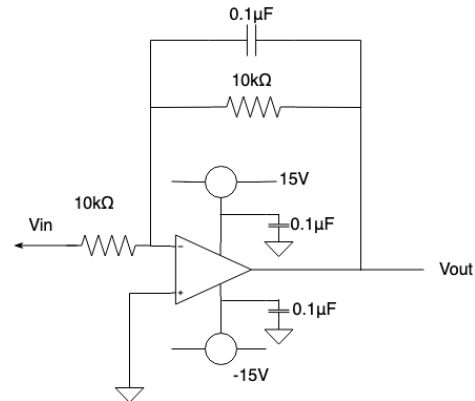


図 18: High pass filter

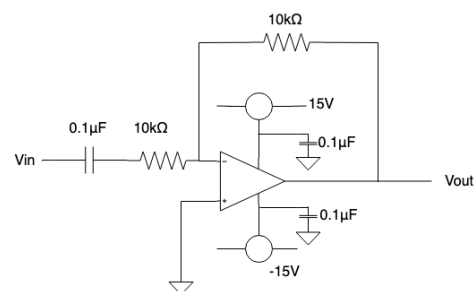


図 19: Low pass filter

4.1.2 Result

測定の結果まず, Low pass filter について以下のような結果が得られた. まずは矩形波についての結果をしめす.

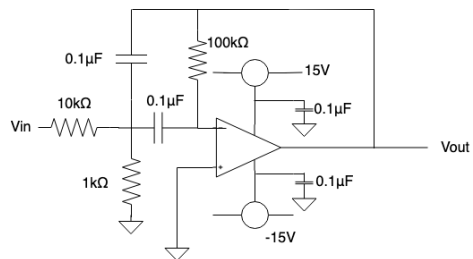


図 20: Band pass filter

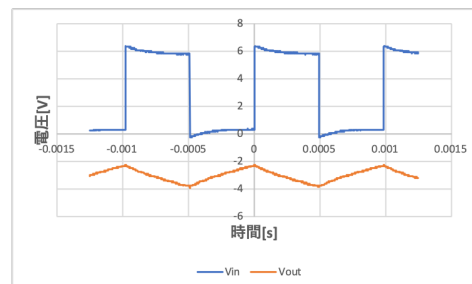


図 23: Low pass filter(Vin 1kHz)

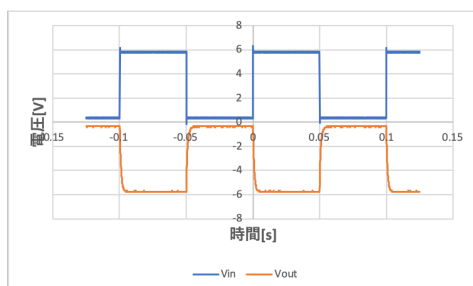


図 21: Low pass filter(Vin 10Hz)

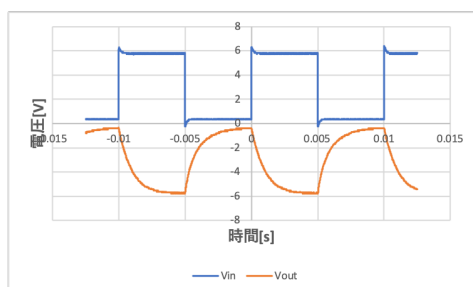


図 22: Low pass filter(Vin 100Hz)

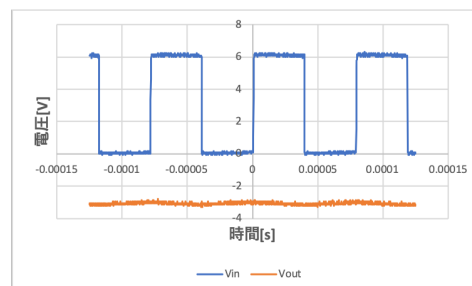


図 24: Low pass filter(Vin 10kHz)

続いて正弦波についての結果を示す.

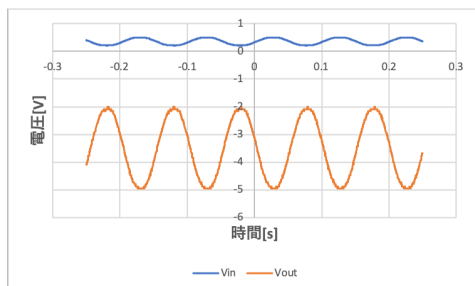


図 25: Low pass filter(V_{in} 10Hz)

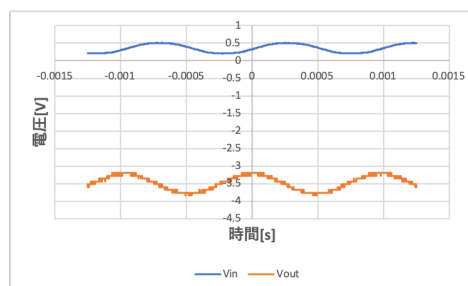


図 27: Low pass filter(V_{in} 1kHz)

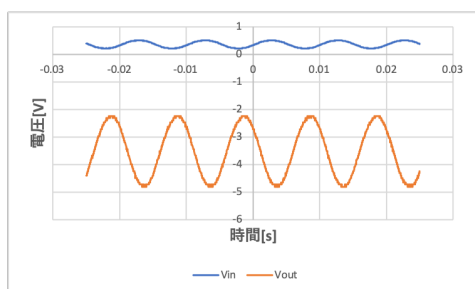


図 26: Low pass filter(V_{in} 100Hz)

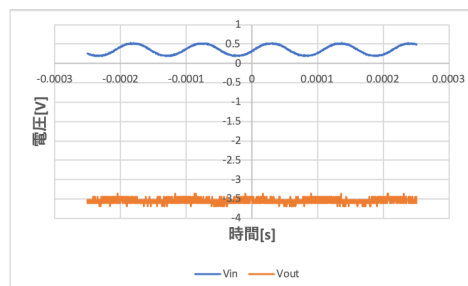


図 28: Low pass filter(V_{in} 10kHz)

さらに High pass filter についても以下のような結果が得られた。まずは矩形波の結果を示す。

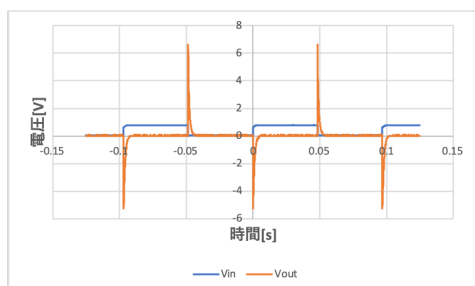


図 29: High pass filter(V_{in} 10Hz)

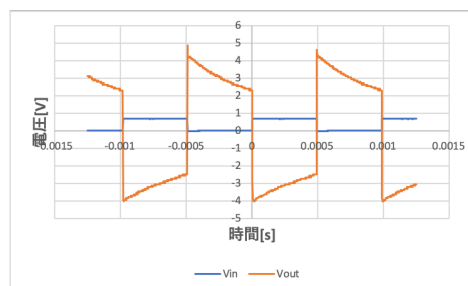


図 31: High pass filter(V_{in} 1kHz)

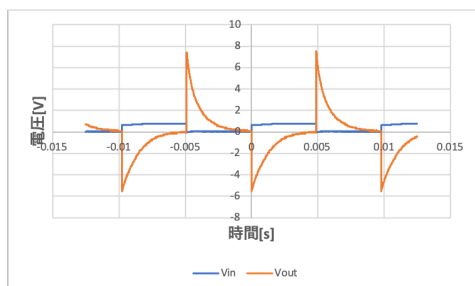


図 30: High pass filter(V_{in} 100Hz)

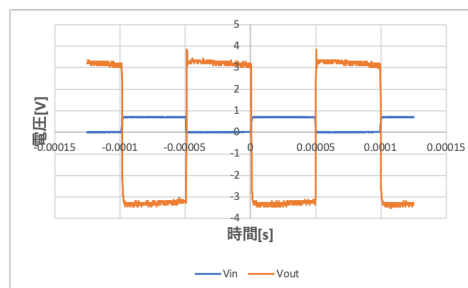


図 32: High pass filter(V_{in} 10kHz)

続いて正弦波の結果を以下に示す。

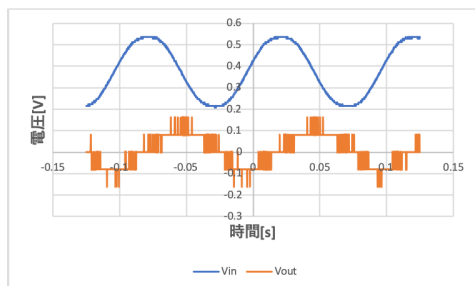


図 33: High pass filter(Vin 10Hz)

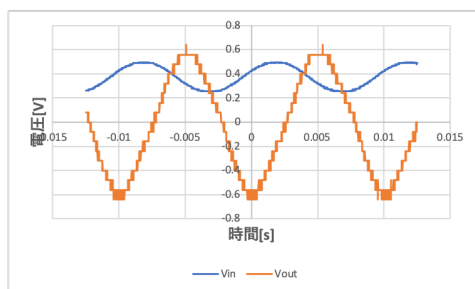


図 34: High pass filter(Vin 100Hz)

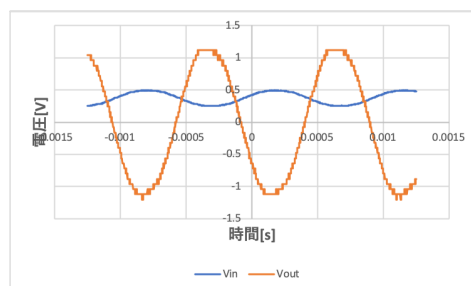


図 35: High pass filter(Vin 1kHz)

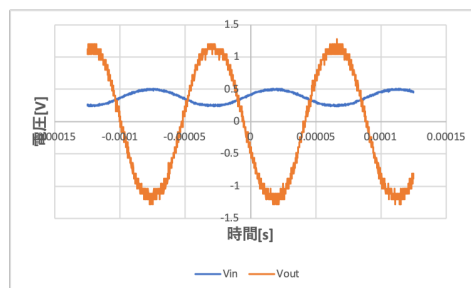


図 36: High pass filter(Vin 10kHz)

最後に Band pass filter についても以下のような結果が得られた。まずは矩形波の結果を示す。

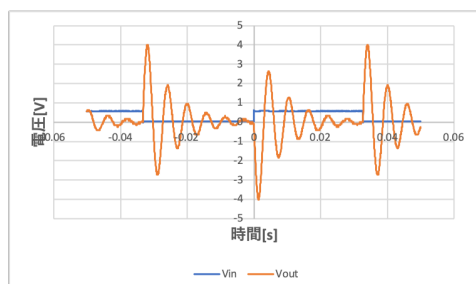


図 37: Band pass filter(Vin 10Hz)

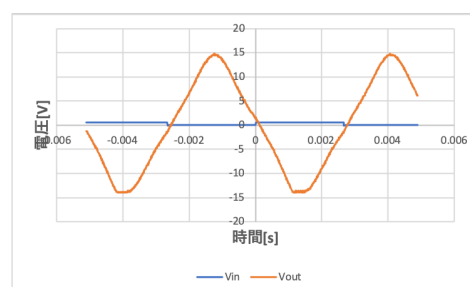


図 39: Band pass filter(Vin 2kHz)

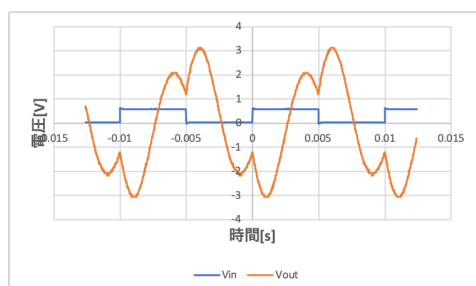


図 38: Band pass filter(Vin 100Hz)

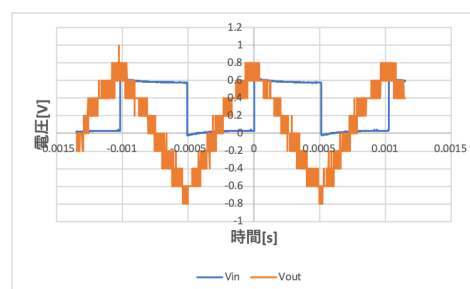


図 40: Band pass filter(Vin 10kHz)

続いて正弦波の結果を以下に示す。

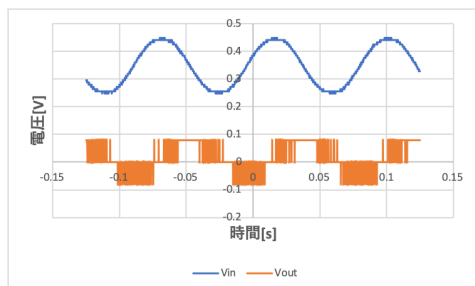


図 41: Band pass filter(V_{in} 10Hz)

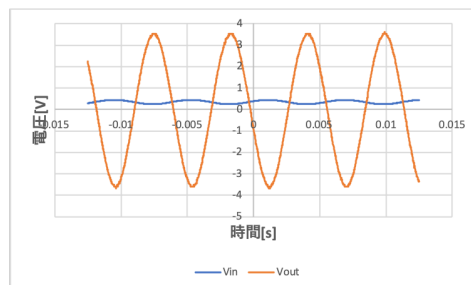


図 43: Band pass filter(V_{in} 1kHz)

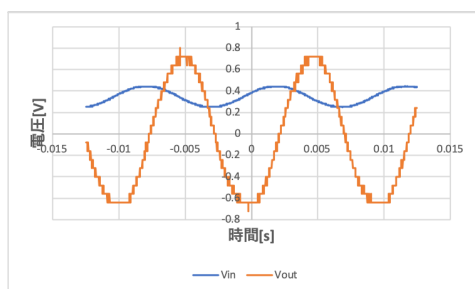


図 42: Band pass filter(V_{in} 100Hz)

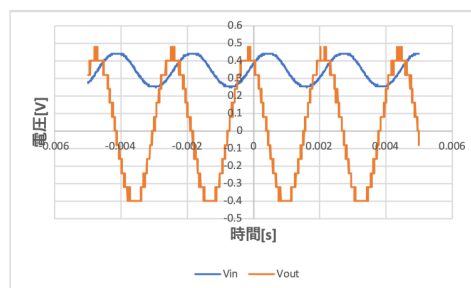


図 44: Band pass filter(V_{in} 5kHz)

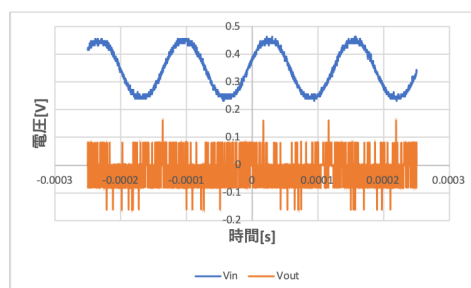


図 45: Band pass filter(V_{in} 10kHz)

実験結果より Low pass filter では入力電圧の周波数が小さい時は元の矩形波を反転させた形の出力が得られたが、周波数が上がるにつれて元の矩形波が変化した際に遅れを生じるようになり指数関数的に追いつくような波形が得られた。特に 1kHz での出力波は三角波のようになり、それ以上周波数が上がると出力は一定値となった。

また、High pass filter では入力電圧の周波数が高くなるにつれて元の矩形を反転させたような出力が得られた。また低周波数領域では入力電圧が変化した瞬間だけ一瞬電圧の大きさが大きくその後指数関数的に減少するような結果となった。

さらに Band pass filter では 10Hz 付近では正弦波の重ね合わせのような出力が得られた。これらの波の振幅は非常に小さかった。また、100Hz 付近になると入力の矩形波を反転させたような出力が得られた。さらに周波数をあげると出力は一定値となった。

またそれぞれの場合において正弦波の入力を与えると Low pass filter では高周波数領域で振幅が小さくなり、High pass filter では低周波数領域で振幅が小さくなり、Band pass filter では低周波数領域と高周波数領域で振幅が小さくなった。また総じてカットされる周波数での出力波は滑らかではなく不連続な波となった。

4.1.3 Discussion

今回はなぜ低周波数領域や高周波数領域の入力をカットできるのかを考察していく。まず、図 19、図 20、図 46 における回路は前回の実験で行なった反転増幅回路とほぼ同じ構造をしているのがわかる。そのことより今回の出力は入力を反転させたような波形であると予測できる。

Low pass filter について考察を行う。図 19 の回路においてキルヒホッフの法則を用いると以

下の微分方程式を立てることができる。

$$RC \frac{dV_{out}}{dt} + V_{out} = -V_{in} \quad (3)$$

この微分方程式をとくと以下のような式を得る。

$$V_{out} = -u(t) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right] \quad (4)$$

この式より t が十分大きい時 \exp の部分は 0 に近づくため出力は入力の反転した値が出てくる。一方で高周波の場合は \exp は 1 に近づくので出力は 0 に近づいていくこととなり実験結果と一致することが確かめられた。

次に High pass filter について考察を行う。図 20 の回路においてキルヒホッフの法則を用いると以下の微分方程式を立てることができる。

$$V_{out} = -RC \frac{d}{dt}(V_{out} + V_{in}) \quad (5)$$

この微分方程式をとくと以下のような式を得る。

$$V_{out} = -u(t) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (6)$$

この式より t が十分小さい時 \exp の値は 1 に近づくこととなり出力は入力の反転した値となる。また t が十分大きい時は \exp の値は 0 に近づくこととなり結果的に出力は 0 となる。この性質は高周波数成分を通し、低周波数成分をカットする性質であるので実験の値とも一致することが確かめられた。

ここで得られた特定の周波数をカットするフィルターの応用例について考えてみる。例えば、画像や音声において人間の目に見えないもしくは聞き取ることができない周波数成分はデータとして余計なのでフィルターに通してカットすることで、元のデータ量を落とすことができる。

5 Digital circuit (6th day)

5.0.1 Purpose

Flip-flop(FF)回路は回路状態を記憶でき、電気回路の前の入出力状態に反応する複雑な機能を実現できるため、デジタル回路において重要な要素である。FFの基礎的な動作を理解するために reset-set FFを作り、FFの応用としてのデジタルカウンターの動作を調べる。

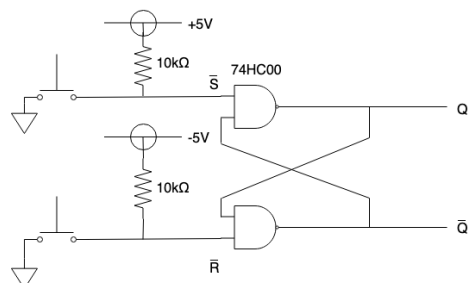


図 46: reset-set FF 回路

5.1 Equipment

- 前回の実験と同様のもの
- CMOS NAND IC 74HC00
- CMOS counter IC 74HC4040
- printed circuit boards
- push switches

5.1.1 Procedure

図 46 に示すようにリセット・セット FF 回路を制作し入力 \bar{S} , \bar{R} の値ををそれぞれ変えながら出力電圧の値を計測する。その計測結果を表にまとめる。

次に図 47 に示すようにデジタルカウンター回路を作り入力電圧をファンクションジェネレーターを用いて矩形波とし、その動作を確認する。入出力電圧をオシロスコープで測定したのち、そのグラフを作りデジタルカウンターの動作について考える。

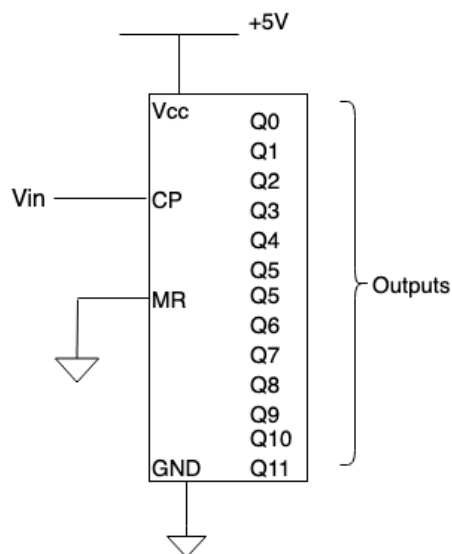


図 47: Diagram of digital counter

5.1.2 Result

まずリセットセット FF 回路の実験における真理表を表 2 に示す。

表 2: reset-set FF 回路の真理表

\overline{S}	\overline{R}	Q_{n+1}	\overline{Q}_{n+1}
1	1	1	1
0	1	0	1
1	0	1	0
0	0	Q_n	\overline{Q}_n

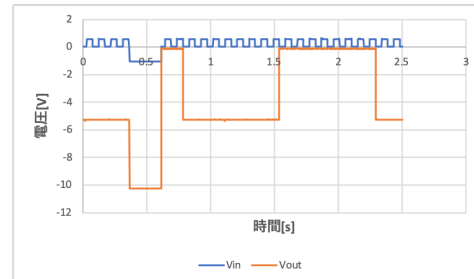


図 50: Q3

次にデジタルカウンタ回路の Q1 から Q5 ま
で測定した結果を以下に示す。

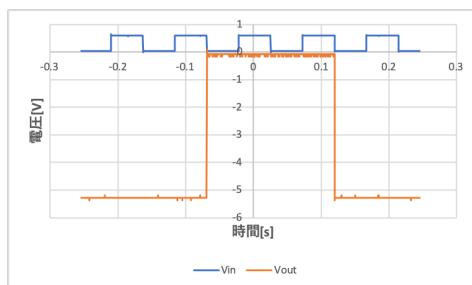


図 48: Q1

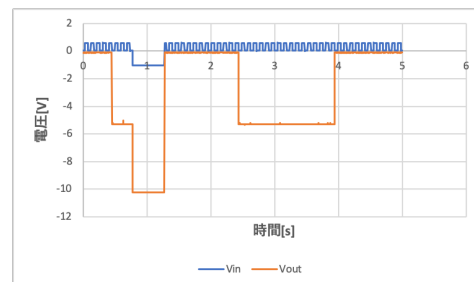


図 51: Q4

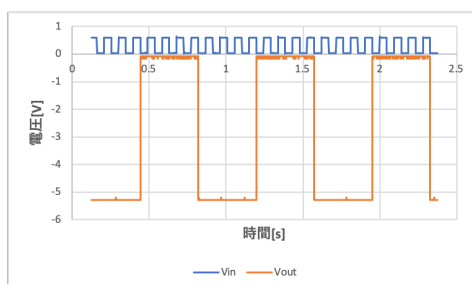


図 49: Q2

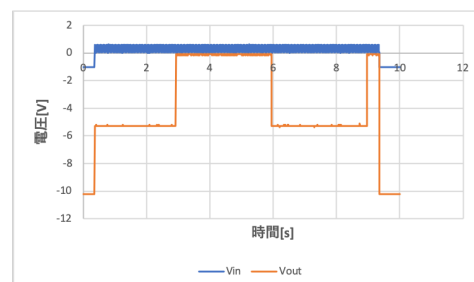


図 52: Q5

5.1.3 Discussion

表2からリセットセットFF回路は入力がないければ前の状態を保持し、(1,0)もしくは(0,1)の入力を受け取ると入力の状態へと遷移するシーソーのような特性を持つことが確かめられた。また(1,1)の入力を渡すと入力後に(1,0),(0,1)のどちらかにランダムに遷移し、状態は不定となるのでフリップフロップ回路においては(1,1)入力を使うべきでないと考えられる。

また図48, 図49, 図50, 図51, 図52においてデジタルカウンタ回路の出力電圧は0Vと-5Vの状態を繰り返すような動作を繰り返しており、この回数を”Count”とすると、出力電圧はファンクションジェネレーターの矩形波をCount回数えるごとに状態を遷移すると考えられる。またCountと入力端子Qの間には以下の関係が成り立つと予想できる。

$$Count = 2^{Q^m} (m = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

また、図50, 図51, 図52において出力電圧に乱れがあり-10Vの出力が発生したのは出力結果をUSBで保存する際にオシロスコプのプローブの接触が悪くなり出力が乱れたことなどが考えられる。

次にカウンタ回路がなぜ動作するのかについて参考文献を参照しながら考えてみる。まず、Dフリップフロップ回路の考え方を導入して考察してみる。そして、ファンクションジェネレーターからの矩形波入力をクロック入力と呼ぶことにする。図53のような基本的なDF/F回路について考える。

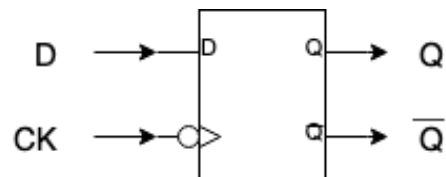


図 53: DF/F 回路

この回路において真理表は以下ようになる。

表 3: DF/F 回路の真理表

D	CK	Q	\overline{Q}
0	↓	0	1
1	↓	1	0

つまりこの回路はQを出力とすれば、クロック入力の立ち下がりにおいて入力Dの状態が出力されるという動作をする。ここで図54のような回路について考える。

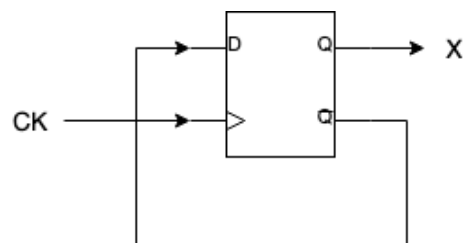


図 54: DF/F 回路 ($D=\overline{Q}$)

この回路のクロック入力に対する出力波は以下のようになる。

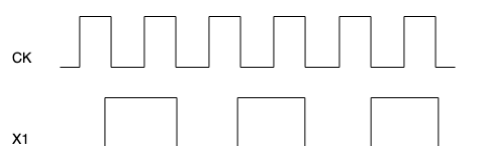


図 55: DF/F 回路の入出力波形

さらに図 54 の回路を 2 個直列につなげた場合図 55 の X の波の立ち下がりを数えるので結果的に出力される波形はクロック入力 2 個分を数えて切り替わる出力となる。またこれは実験における Q1 の波形に他ならない。

同様に図 54 の回路を 3 個直列につなげた場合は 2 個直列に繋げた場合の 2 倍分の入力を数えて出力波を出すので結果としてはクロック入力 4 個分を数えて切り替わる。以下同様にこの回路を繋げていくと 2 の乗数分クロック入力を数えて出力が切り替わるカウンター回路を作ることができる予想される。

ここでフリップフロップ回路の応用例について考えてみる。フリップフロップは前の状態を保存しておくことができるのでコンピュータのメモリなどに使うことができると予想できる。

また、このカウンター回路の応用例としては周期ごとにカウントをしていくので交流電源を矩形波に変換して使えばタイマーのような時間を図ることのできる素子を形成できることが予想される。

参考文献

- [1] 松原洋平 『電気回路の基本 66』 (2011)
- [2] 『応用物理学実験』