

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 11 月 11 日木曜日 午後 1 時～午後 5 時

天気 晴

気圧・気温・湿度 省略

2 実験の目的

OP アンプを使った代表的な回路を試作し、回路の特性を調べて OP アンプ回路への理解を深める。

3 実験の原理

3.1 OP アンプの原理

オペアンプは動作のために電源（通常 $\pm 15\text{V}$ ）が必要であるものの、増幅回路にとどまらずアナログ信号の加減算回路、微積分回路、フィルタ回路、信号処理回路（リミッタ回路、絶対値回路、実効値変換回路、コンパレータ回路など）や波形発生回路など幅広い種類の回路を構成できる。図 1 にオペアンプの回路記号を示す。三角形の左側の 2 本の線が入力端子で、 $-$ の符号がある方を反転入力端子、 $+$ の符号がある方を非反転入力端子と呼ぶ。右側の 1 本の線が出力端子である。ここで、図 1 のように各端子の電圧を定義すれば、

$$e_0 = \mu(e_2 - e_1) \quad (1)$$

という関係がある。 e_1 および e_2 は直流信号でも交流信号でも構わない。このようにオペアンプは 2 つの入力端子に加わった電圧の差分のみを増幅する働きをもつ。ここで、 μ は正の数で、オペアンプの差動利得あるいは電圧利得と呼ばれており、直流信号あるいは周波数が 10Hz 程度までの交流信号に対しては 105～106 程度の非常に大きな数値である。交流信号の周波数が 10Hz 程度以上になると、電圧利得は周波数に比例して減少していき、ある周波数（1MHz～10MHz 程度）で 1 となる。

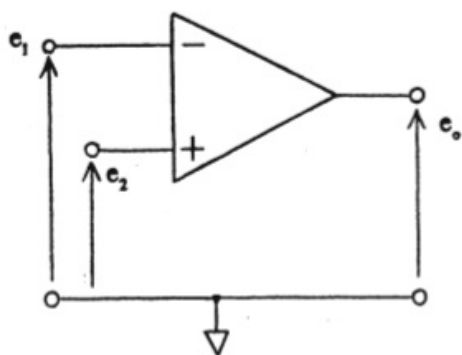


図 1 OP アンプの回路記号と端子電圧の定義

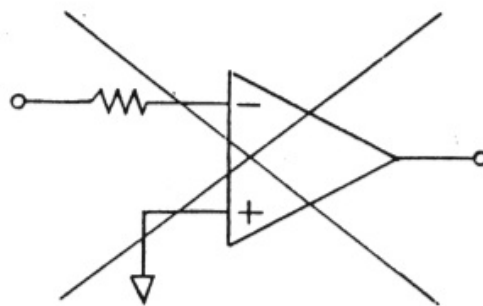


図 2 閉ループのままでは使用不可である

理想的なオペアンプでは、入力端子に電流は流れ込まず、出力電圧は負荷に影響されない。換言すれば、入力インピーダンスは ∞ であり、出力インピーダンスは 0 である。しかし実際のオペアンプでは、入力端子に

電流は流れ込み、出力端子に沢山の電流を流すような負荷を接続することはできない。また、両入力端子の電圧をゼロとすれば理想的なオペアンプでは出力には何も現われないが、実際のオペアンプでは入力オフセット電圧や入力オフセット電流などの影響で出力端子に直流電圧が現われる。これ以外にも、実際のオペアンプでは理想オペアンプと比べて特性上いろいろな制限があり、応用する場合に注意する必要がある。理想的オペアンプの機能をまとめると以下のようになる。

1. $e_0 = \mu(e_2 - e_1)\mu \gg 1$
2. 入力端子に電流は流れない。
3. 出力 e_0 は付加に影響されない。

ここで、 $\mu = 106$ 、 $e_0 = 10V$ とすると、 $e_2 - e_1 = 10\mu V$ となり、 e_0 の $10V$ に比べてほぼゼロに近く、 $e_2 \simeq e_1$ である。電圧利得 ∞ の理想オペアンプでは、 $e_2 = e_1$ である。

オペアンプは図 2 のように出力から入力に信号を戻さない開ループの状態で使用することはほとんどない。オペアンプを開ループで使用すると、電圧利得が非常に大きいので、たとえオペアンプが理想的な動作をしている場合でも、わずかの入力信号に対して大きな出力電圧が現われ、出力が飽和する。実際のオペアンプでは内部のオフセット電圧のために、開ループのままでは入力に信号を加えないときにも大きな直流電圧が現われ、増幅器として使用できない。従って、オペアンプでは、必ず出力信号の一部を入力へ戻す回路（帰還回路）を付加して使用しなければならない。帰還回路には入力信号と反対の極性の信号を戻す負帰還と、入力信号と同じ極性の信号を戻す正帰還とがある。図 3 に帰還回路の原理をブロック図で示す。ここで、 e_i は入力信号、 e_0 は出力信号である。ブロック A の部分は利得 μ の増幅器で、 $e_0 = \epsilon\mu$ の特性を持ち、ブロック B の部分が出力信号の一部を入力へ戻す帰還回路で、 $e_0\beta$ という成分が帰還され、合成点の符号は、正帰還の場合+、負帰還の場合-となる。 β を帰還率と呼ぶ。オペアンプ回路では負帰還回路が多く用いられる。

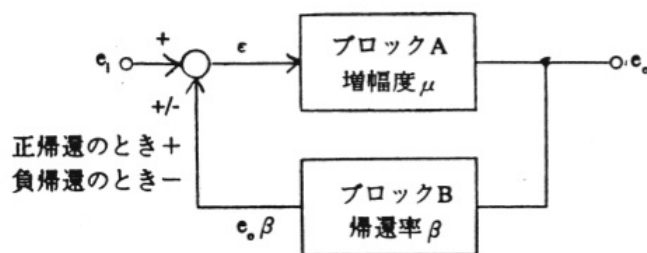


図 3 帰還回路の原理

3.2 非反転・反転増幅回路

図 4 に非反転増幅回路を示す。この回路で、反転入力端子の電圧は分圧の法則から $R_1 e_0 / (R_1 + R_2)$ であり、非反転入力端子の電圧は e_i であるから、

$$e_0 = \mu e_i - R_1 e_0 / R_1 + R_2 \quad (2)$$

となる。ここで、 $R_1(R_1 + R_2) = \beta$ とおいて式を整理すると、

$$e_0 = \mu e_i / (1 + \mu\beta) \quad (3)$$

となり、図3の帰還回路の原理と直接に対応していることがわかる。ここで、 $\mu \gg 1$ とすると、

$$e_0 \simeq e_i / \beta = (R_1 + R_2)e_i / R_1 \quad (4)$$

となり、図4の回路は電圧利得が $(R_1 + R_2)/R_1$ の増幅器となっていることがわかる。

図4の非反転増幅回路の入出力の関係を求める方法として、電圧利得 ∞ の理想オペアンプの考え方をを用いるやり方もある。理想オペアンプでは入力端子には電流は流れ込まないので、オームの法則により、反転入力端子の電圧は、 $R_1 e_0 / (R_1 + R_2)$ となる。一方、電圧利得 ∞ の理想オペアンプでは反転入力端子の電圧と非反転入力端子の電圧は等しいので、

$$e_i = R_1 e_0 / (R_1 + R_2) \quad (5)$$

となり、

$$e_0 = (R_1 + R_2)e_i / R_1 \quad (6)$$

となって、4式と同じ結果が得られる。

図5に示す反転増幅回路についても同様の考え方で入出力の関係が得られる。すなわち、反転増幅回路では、図5に示すように非反転入力端子は接地されているので電位は0Vである。また、反転入力端子の電位は非反転入力端子の電位に等しいはずであるから、やはり0Vである。入力端子には電流は流れ込まないので、 R_1 を流れる電流と R_2 を流れる電流の大きさは等しくなる。電流の向きを考えると、 $e_i / R_1 = -e_0 / R_2$ となり、

$$e_0 = -\frac{R_2}{R_1} e_i \quad (7)$$

が得られる。このように反転増幅回路では入力と出力の電圧の極性が反対になり、抵抗値の比 R_2/R_1 が電圧利得に等しくなる。

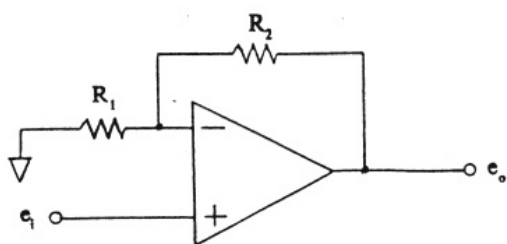


図4 非反転増幅回路

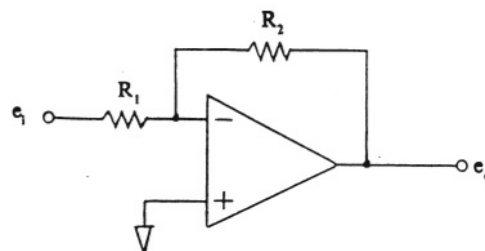


図5 反転増幅回路

4 使用器具及び装置

- OP アンプ実験装置
- 発振器
- オシロスコープ
- 配線コード
- 筆記用具・実験レジュメ・実験ノート

5 実験結果

実験 1：オフセット調整 OP アンプ実験装置の基板上に図 6・7 のような回路を組んだ。OP アンプ内部のトランジスタのバイアス特性のばらつきの影響で、入力が 0V でも出力が 0V になるとは限らないため、入力を短絡した状態でオフセット調整用抵抗器を回して出力が 0 になるよう調整した。

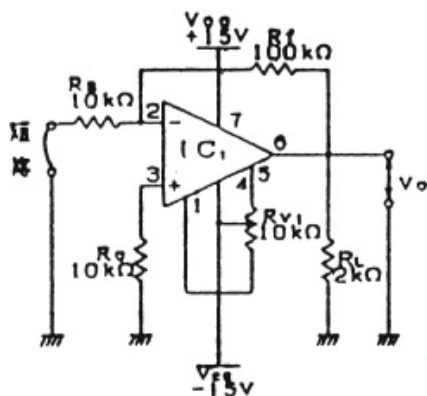


図 6 反転増幅回路 (増幅度 10)

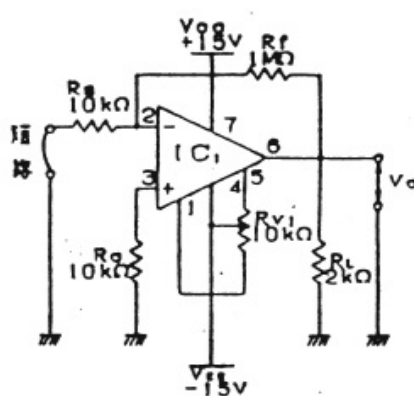


図 7 反転増幅回路 (増幅度 100)

実験 2：直流増幅回路の入出力特性 実験 1 で組んだ図 8・9 の回路の入力に直流電源をつなぎ、増幅度 10 の回路では入力電圧を-1500mV から 1500mV まで 100mV 刻みで、増幅度 100 の回路では-150mV から 150mV まで 10mV 刻みで変化させながら、出力電圧の変化を記録した。結果を表 1 に示す。この表を元にグラフを描いたところ図 10・11 のようになった。

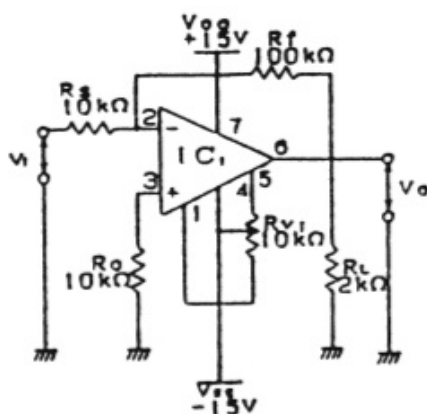


図 8 反転増幅回路 (増幅度 10)

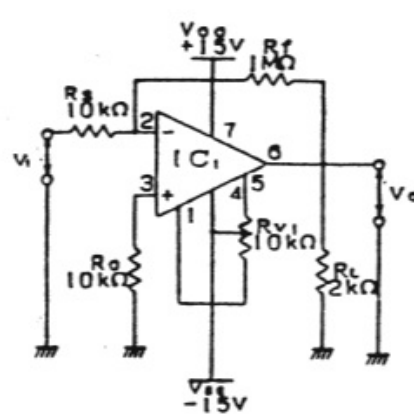


図 9 反転増幅回路 (増幅度 100)

実験 3：交流増幅回路の周波数特性 図 12 のような交流増幅回路を組み立てオフセット調整を行った後、入力に発振器を接続し正弦波入力の振幅を一定に保ちながら周波数を変化させてそれぞれの周波数における出力電圧の振幅をオシロスコープで観察した。計測は出力波形が歪み始めるまで行った。結果を表 2 に示す。これを元にして入力電圧ごとに出力電圧-入力周波数グラフを描いたものを図 13 に示す。

実験 4：絶対値増幅回路の入出力特性 図 14 のような絶対値増幅回路を組みオフセット調整を行った後、直流

表 1 実験 2：反転増幅回路における入出力電圧の関係

増幅度 10		増幅度 100	
入力電圧 [mV]	出力電圧 [V]	入力電圧 [mV]	出力電圧 [V]
1500	-12.39	148.8	-12.45
1400	-12.39	138.7	-12.44
1300	-12.38	130.7	-12.43
1200	-12.15	119.5	-12.05
1100	-11.11	109	-10.98
1000	-10.11	101.6	-10.25
900	-9.17	90.8	-9.16
800	-8.09	80.3	-8.09
700	-7.16	69.3	-6.99
600	-6.08	58.8	-5.92
500	-5.07	48.8	-4.97
400	-4.10	40.5	-4.08
300	-3.10	29.5	-2.98
200	-2.08	19.3	-1.95
100	-1.08	8.3	-0.84
0	-0.07	0	-0.07
-100	1.04	-9.8	0.97
-200	2.12	-20.3	2.03
-300	3.09	-30.4	2.99
-400	4.03	-42	4.21
-500	5.06	-50.6	5.07
-600	6.14	-60.1	6.02
-700	7.14	-70.9	7.10
-800	8.11	-81.3	8.13
-900	9.15	-88.8	8.90
-1000	10.15	-99.7	9.98
-1100	11.16	-111.6	11.2
-1200	12.16	-121.4	12.16
-1300	13.21	-131.4	13.15
-1400	13.58	-140	13.61
-1500	13.58	-150.9	13.6

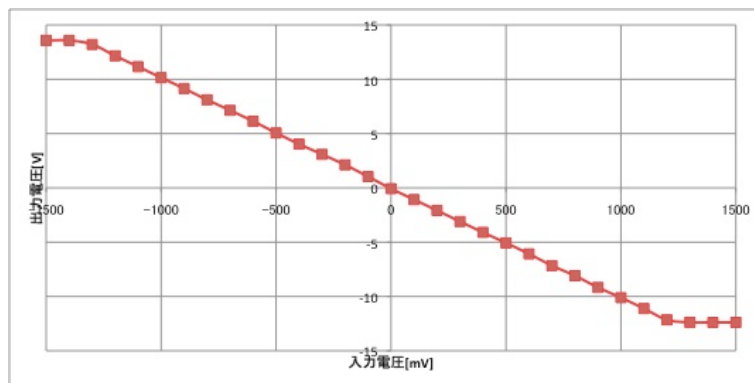


図 10 反転増幅回路における入出力電圧の関係（増幅度 10）

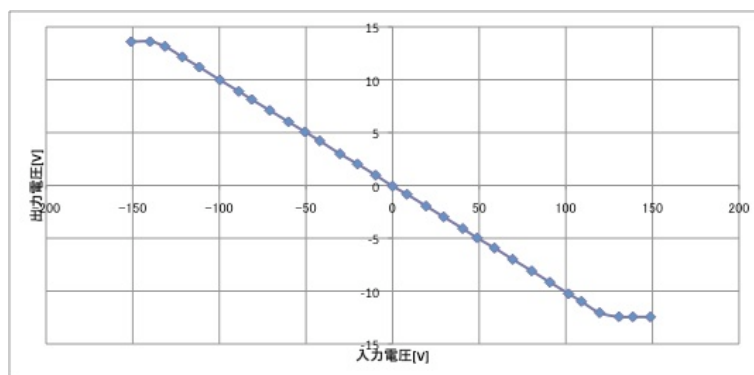


図 11 反転増幅回路における入出力電圧の関係（増幅度 100）

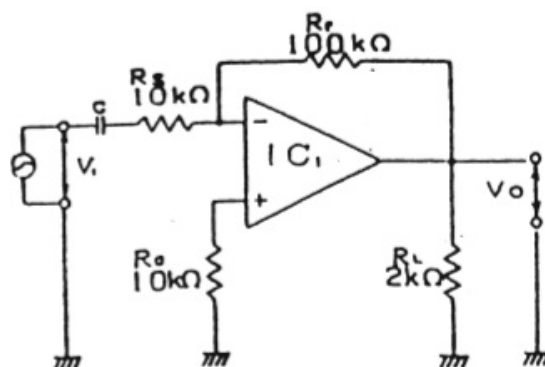


図 12 交流増幅回路（増幅度 10）

表 2 実験 3：交流増幅回路の周波数特性

周波数 [Hz] \ 電圧 [V]	0.01	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
100	0.104	0.520	1.00	2	4.12	6.08	8.08
200	0.104	0.500	1.00	2	4.08	6.04	8.00
300	0.100	0.520	1.00	2	4.08	6.04	8.00
500	0.100	0.520	1.00	2	4.04	6.04	8.00
700	0.100	0.520	1.00	2	4.04	6.04	7.92
1000	0.100	0.500	1.00	2	4.08	6.04	8.00
2000	0.095	0.500	1.00	2	4.08	6.04	8.00
3000	0.0952	0.500	1.00	2	4.08	6.04	7.92
5000	0.0944	0.500	1.00	2	4.04	6.04	7.92
7000	0.0936	0.500	1.00	2	4.04	5.96	7.92
10000	0.0928	0.480	1.00	2	4.00	5.96	7.92
20000	0.0904	0.480	0.96	2	3.88	5.68	7.44
30000	0.088	0.460	0.92	1.84	3.64	5.16	6.40
50000	0.0768	0.420	0.84	1.6	2.86	3.76	4.12
70000	0.0688	0.370	0.72	1.36	2.22	2.84	3.00
100000	0.056	0.290	0.60	1.04	1.64	2.04	2.12
200000	0.0328	0.170	0.32	0.544	0.856	0.976	1.03
300000	0.0224	0.110	0.22	0.376	0.568	0.656	0.680
500000	0.0136	0.064	0.11	0.218	0.326	0.372	0.392
700000	0.0096	0.040	0.072	0.148	0.230	0.258	0.270

入力電圧-14V から 14V まで 1V 刻みで変化させて出力電圧の変化を観察した。結果を表 3 に示す。これを元にグラフを描いたところ図 15 のようになった。出力電圧が極大になる時の入力電圧は 12.22V で、この時の出力電圧は 12.16V であった。

実験 5：低域ろ波回路（ローパスフィルタ）の周波数特性 図 16・17 にそれぞれ示すような、遮断周波数 1kHz の 2 次形低域ろ波回路および 4 次形低域ろ波回路の周波数特性を測定した。測定は入力電圧を 1V と 5V の 2 通りに分けて行なった。結果を表 4・5 に示す。これを元にグラフを描いたところ図 18・19 のようになった。

実験 6：高域ろ波回路（ハイパスフィルタ）の周波数特性 図 20 に示す遮断周波数 1kHz の 2 次形高域ろ波回路の周波数特性を測定した。結果を表 6 に示す。

6 検討

1. 実験 2 について、増幅度 10 の反転増幅回路では極性が ± 反転し、かつ電圧が約 10 倍されることが分かった。ただし入力電圧の絶対値が大きくなるほど増幅率が悪くなり、入力が 1300mV 以上と-1400mV 以下では飽和する傾向が見られた。増幅度 100 の回路も極性が反転し、出力は入力の約 100 倍であっ

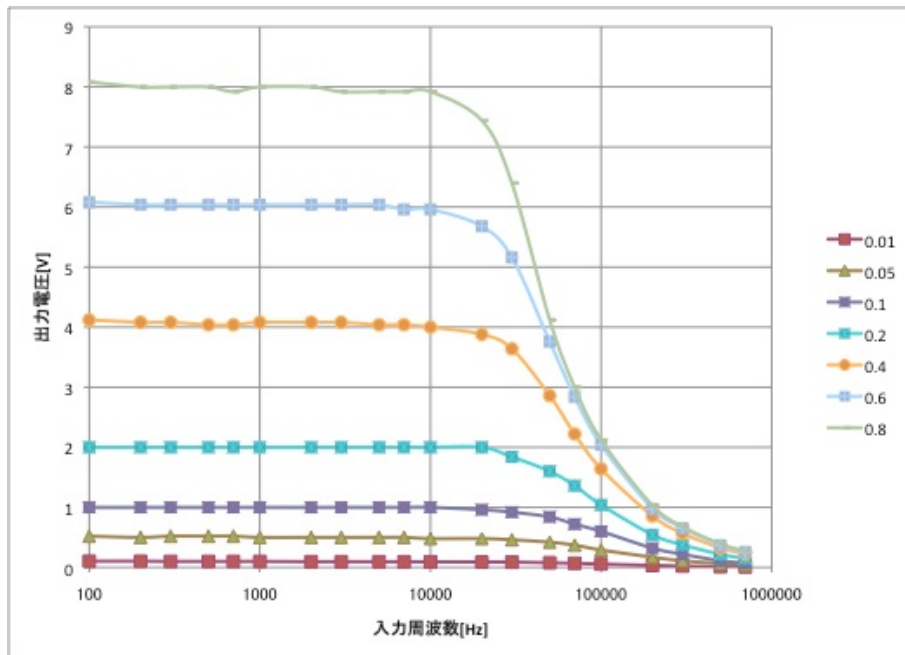


図 13 交流増幅回路の周波数特性

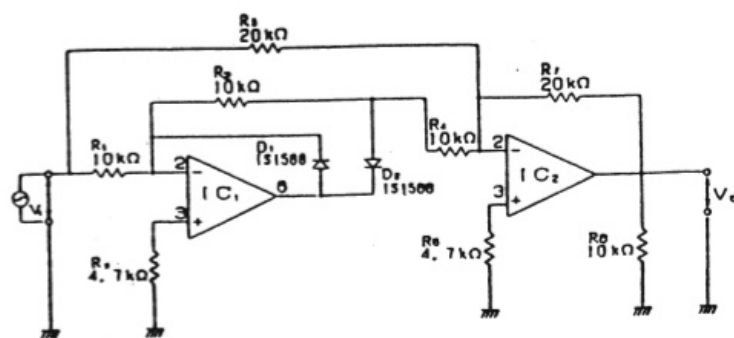


図 14 絶対値増幅回路

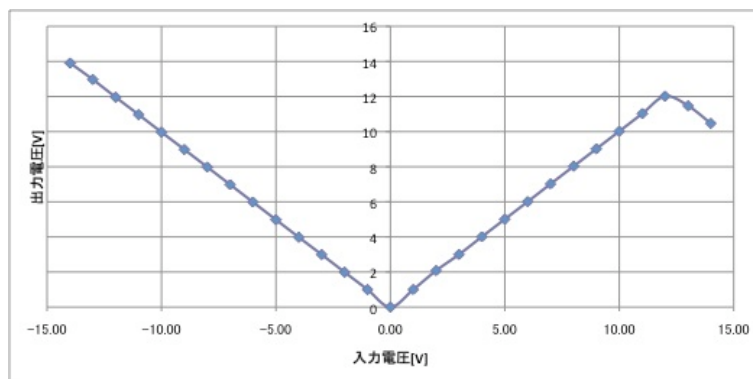


図 15 絶対値増幅回路の入出力特性

表 3 実験 4：絶対値増幅回路の入出力特性

入力電圧 [V]	出力電圧 [V]	入力電圧 [V]	出力電圧 [V]
14.00	10.47	-1.00	1
13.01	11.47	-2.00	1.99
12.00	12.02	-3.00	2.99
11.01	11.03	-4.00	3.98
10.00	10.02	-5.00	4.98
9.00	9.02	-6.01	5.99
8.01	8.03	-7.00	6.98
7.00	7.02	-8.00	7.98
6.00	6.01	-9.00	8.98
5.00	5.01	-10.0	9.97
4.00	4.01	-11.0	10.97
3.00	3	-12.0	11.96
2.00	2.08	-13.0	12.97
1.00	1	-13.99	13.91
0	0		

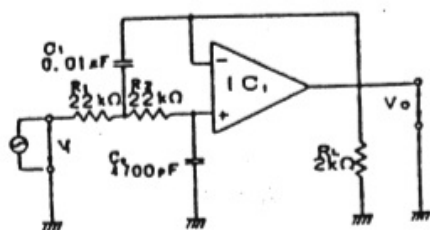


図 16 2次形低域ろ波回路（ローパスフィルタ）

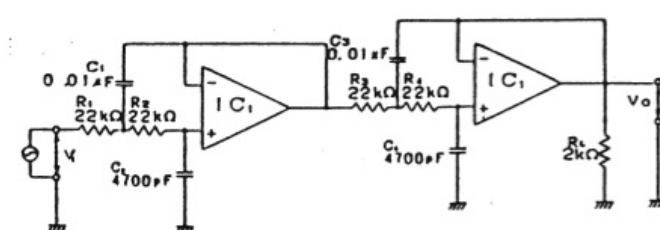


図 17 4次形低域ろ波回路（ローパスフィルタ）

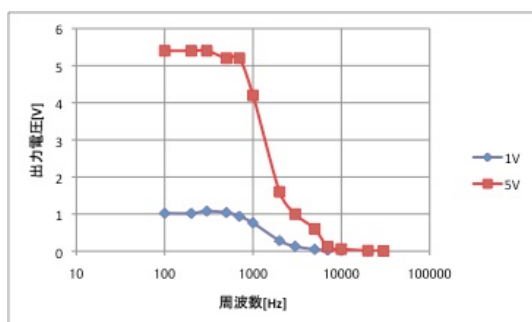


図 18 2次形低域ろ波回路の周波数特性

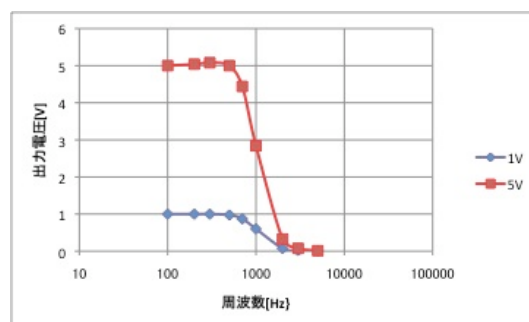


図 19 4次形低域ろ波回路の周波数特性

表 4 実験 5：2 次形低域ろ波回路の周波数特性

周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	
	入力 1V	入力 5V
100	1.02	5.4
200	1.02	5.4
300	1.08	5.4
500	1.04	5.2
700	0.94	5.2
1000	0.76	4.2
2000	0.282	1.6
3000	0.13	1
5000	0.048	0.6
7000	0.0246	0.118
10000	0.0136	0.058
20000	0.0038	0.0156
30000	0.0023	0.0072

表 5 実験 5：4 次形低域ろ波回路の周波数特性

周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	
	入力 1V	入力 5V
100	1	5
200	1	5.04
300	1	5.08
500	0.976	5
700	0.872	4.44
1000	0.6	2.84
2000	0.0744	0.328
3000	0.0186	0.076
5000	0.00808	0.0126

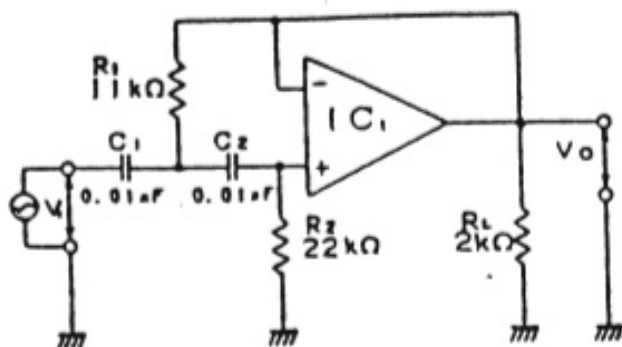


図 20 高域ろ波回路（ハイパスフィルタ）

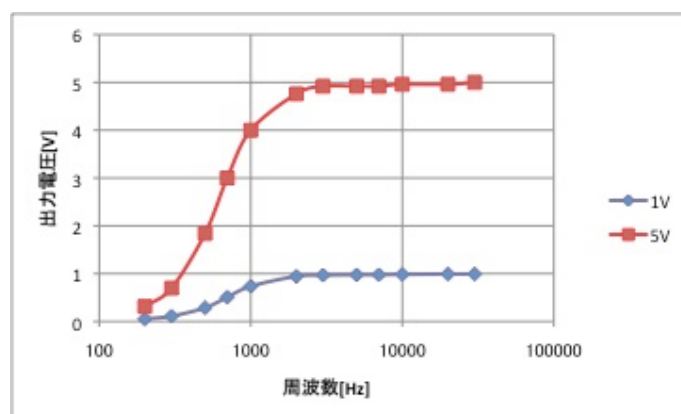


図 21 高域ろ波回路の周波数特性

表 6 実験 6：高域ろ波回路の周波数特性

周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	
	入力 1V	入力 5V
30000	0.992	5
20000	0.992	4.96
10000	0.984	4.96
7000	0.976	4.92
5000	0.976	4.92
3000	0.968	4.92
2000	0.944	4.76
1000	0.736	4
700	0.508	3
500	0.286	1.84
300	0.11	0.696
200	0.0516	0.312

たが、やはり入力電圧の絶対値が大きくなると増幅度が飽和する傾向が見られた。これは OP アンプの入力電圧に限界があることを示していると考えられる。

- 実験 3 について、入力電圧振幅が大きいほど出力電圧振幅も大きくなり、低周波数領域では約 10 倍に増幅された。しかし高周波数領域に近づくとも増幅率が下がり、1 倍以下にまで減少した。増幅率が変化する始める周波数は 20kHz 付近であった。これより、交流増幅回路には増幅できる入力交流信号の周波数に限界があることが分かる。
- 実験 4 について、グラフより実験で用いた絶対値増幅回路は入力電圧の符号に関係なく + の極性で増幅度 1 の信号を出力することが分かった。ただし +12V 以上では極地を持って減少してしまった。これは後の考察で述べるようにダイオードの電圧が飽和してしまうためだと考えられる。
- 実験 5 について、入力電圧振幅が大きいほど出力電圧振幅も大きくなった。2 次形低減ろ波回路では 700 から 1000Hz の間に遮断周波数を持つ減衰曲線が得られた。高周波数領域では出力はほぼ 0 になっている。
4 次形低減ろ波回路でも 500 から 700Hz の間に遮断周波数を持つ減衰曲線が得られた。2 次形と同じく高周波数領域では出力はほとんど 0 になっており、遮断周波数以下の交流信号のみをよく通すことが分かる。
- 実験 6 について、高周波数領域をよく通し、遮断周波数が 2kHz から 3kHz 付近にあるハイパスフィルタの特性カーブが得られた。入力電圧振幅が大きいほど出力電圧振幅も大きくなることが分かる。

7 考察

- 以下の用語について説明する。
(a) 開ループ特性：OP アンプの入出力端子間を接続せず、独立させて回路を組んだ時の特性。出力は

入力にフィードバックされない。

- (b) 閉ループ特性：OP アンプの入出力端子間を何らかの阻止で接続して回路を組んだ時の特性。出力が入力にフィードバックされるのが特徴である。
- (c) 同相モード除去比：OP アンプのような差動増幅器において、2 端子間電圧の差に対する差動モードゲインと 2 端子間電圧の平均値に対する同相モードゲインの比で CMRR と省略される。 $CMRR = \frac{\text{差動モードゲイン}}{\text{同相モードゲイン}}$ の式で与えられ^{*1}、この比率が大きいほど理想的な OP アンプに近いと言える。
- (d) バーチアルショート：式 1 において、理想的な OP アンプの電圧利得 μ が ∞ になったとき、 e_0 が有限の値を持つためには入力電圧の差 $e_2 - e_1$ が 0 になる必要がある。よって $e_1 = e_2$ という関係が成り立つ。これはあたかも入力端子の電圧が一致しているかのように見えることから仮想短絡、あるいはバーチャルショートと呼ばれる。
- (e) スルーレート：大振幅パルス波形入力に対する応答速度を表す指標で、 $\frac{\text{出力電圧}}{\text{立ち上がり時間}}$ で計算され単位には $[V/\mu s]$ などが用いられる。一般にスルーレートが大きいほど応答がよく良い OP アンプであると言える。
- (f) 周波数特性：周波数ともう一つ別の物理量との関係を表したものの。当実験では周波数によって出力電圧がどう変化するかを調べるため、入力電圧を固定し周波数を変えながら出力電圧をプロットした。
- (g) ゲイン帯域幅積：増幅器の特性を表す特性の一つで、GB 積とも呼ばれる。ある周波数 f における開ループゲインを A とすれば $A \times f$ で求められる。
- (h) セトリングタイム：入力（一般的にはステップ入力）を受けて出力が立ち上がってから目標値の範囲内に収束するまでにかかる時間のこと。
- (i) 正帰還：出力信号の一部を同位相のままで入力信号に戻して合成すること。
- (j) 負帰還：出力信号の一部を逆位相にして入力信号に戻して合成すること。

2. 理想 OP アンプの問いについて、以下回答のみを示す。

(A) : ∞ 、(B) : ∞ 、(C) : 0、(D) : 0、(E) : 0、(F) : ∞ 、(G) : ない、(H) : $\frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2}$ 、(I) : $-K \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2}$ 、(J) : $\frac{R_1 + R_2}{K} V_{out} = -(R_1 V_{out} + R_2 V_{in})$ 、(K) : $-\frac{R_2}{R_1} V_{in}$

3. 図 22 に示すような反転増幅回路において、負荷抵抗 R_L の値には適正值がある。OP アンプには最大出力電圧があり、一般的に電源電圧の 70% である。この時負荷抵抗を極端に大きくすると軽負荷になり、出力回路に電流は流れなくなってしまう。これでは望んだ動作が期待できない。逆に抵抗負荷を極端に小さくすると出力電流が増加して過負荷の状態になってしまう。すると抵抗での発熱が大きくなるなどして素子を痛めることになる。負荷としての適性抵抗値は 2~10k Ω である。
4. 図 22 において帰還抵抗 R_f と入力抵抗 R_i にも適正範囲が存在する。その理由としてまず増幅度の問題がある。増幅度を上げるためには考察 2 で述べたように帰還抵抗を大きく、入力抵抗を小さくすれば良い。ただし、増幅度を無闇矢鱈に大きくすると回路の動作が不安定になってしまう。そのため R_f と R_i の比率に注意する必要がある。

次に R_f について、極端に大きくし過ぎると帰還回路の動作が不安定になる。実験的に 1000k Ω 以下が望ましい。逆に小さくし過ぎると抵抗に大電流が流れ、素子が壊れる原因になってしまう。

^{*1} 文献によっては分母と分子を逆にして表現する場合もある。

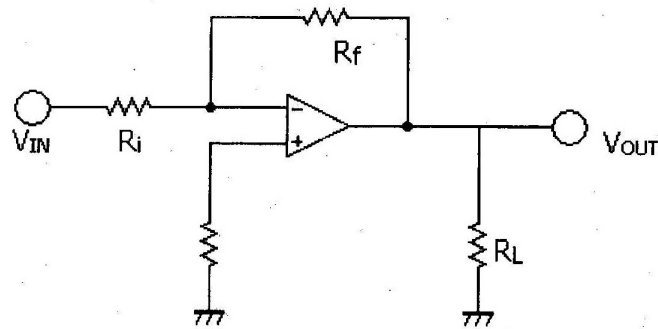


図 22 考察 3・4：反転増幅回路

さらに R_f は入力インピーダンスそのものであるので、前につながる電源装置などの内部抵抗・回路抵抗よりも大きくしておかないと電圧降下が大きくなり、抵抗での熱消費など無駄が増えてしまう。よって下限値が存在する。一方 R_f 大きくし過ぎると入力オフセット電流の電圧降下の影響が大きくなり、これも無駄になってしまう。よって上限値も存在する。

5. (a) 実験 4 においてダイオード $D_1 \cdot D_2$ の極性を入れ替えたときの動作を考える。図 14 のダイオードの極性を入れ替える前の回路は、1 段目の OP アンプ IC_1 周辺が半波整流回路、2 段目の OP アンプ IC_2 周辺が加算回路である。ダイオードの極性を入れ替えると、 $V_I > 0$ のとき電流は R_1 から D_1 を通って 6 番端子に至る。ここで 2 番端子はバーチャルショートで 3 番端子と同じ電位にあるから 0V で、出力も 0V になる。一方 $V_I < 0$ のとき、電流は D_1 、 R_2 から R_1 を流れるので、反転増幅回路と同じ動作をし、 $R_1 = R_2$ であるから式 7 より出力は入力の極性を逆にした $-V_I$ 、すなわち正の値になる。これを IC_2 の加算回路で足し合わせると、キルヒホッフの電流則から IC_2 の出力電圧は R_3 を流れてきた電流と R_4 を流れてきた電流から求めることができ、 $R_3 = 2R_4 = R_5$ を考慮すると

$$V_O = - \left(\frac{R_5}{R_3} V_I + \frac{R_5}{R_4} (IC_1 \text{ の出力電圧}) \right) = -(V_I + 2IC_1 \text{ の出力電圧}) \quad (8)$$

となる。以上より $V_I > 0$ のとき $V_O = -V_I$ 、 $V_I < 0$ のとき $V_O = V_I$ となる。つまり出力電圧は入力電圧の絶対値に - を付けた値になり、図 15 を x 軸で反転したような入出力特性になると考えられる。

- (b) 実験 4 において、絶対値増幅回路で極大値を持つ理由はダイオードの逆方向バイアスが大きくなって降伏現象が起こるためだと考えられる。入力に正の電圧が加わったとき、 D_1 には逆方向の電位差がかかり。さらに入力電圧を上げていくと D_1 は降伏領域に入り逆方向電流が流れ始める。つまり、入力から入った電流が D_1 と D_2 で分流され、結果半波整流回路の出力電圧が徐々に下がり、加算回路を通った後の出力電圧が極値を持って減少し始めたのだと考えられる。
- (c) 図 23 のように組んだ回路で図 24 のような入力信号を入れたときの出力波形を検討する。ただし $R_1 = R_2 = R_3 = 2R_4 = R_5$ とする。コンデンサがないときの出力は入力を $V_{in} = V \sin \omega t$ とおくと $V_{out} = V |\sin \omega t|$ になる。 V_{in} が正の時はこれまでの考察のとおり半波整流回路が -1 倍の反転増幅回路として働くので、この回路のみの出力は $-V_{in}$ になる。そして加算回路を通った出力は $V_{in} > 0$ である。 R_3 を通ってきた電流 $\frac{V_{in}}{R_4}$ と R_4 を通ってきた電流 $-\frac{V_{in}}{R_3}$ の和が加算回路に

流れるが、出力電圧がコンデンサの電位差よりも大きくなったときはコンデンサ C に電流が流れて充電される。一方出力電圧がコンデンサの電位差と同じときは R_5 を介して電荷が放電される。 V_{in} が負の時も同様の考え方で出力が $-V_{in} > 0$ になる。以上より、出力波形は図 25 のようになり、交流信号が平滑化され直流に近くなっていることがわかる。このことから C は平滑コンデンサと呼ばれる。

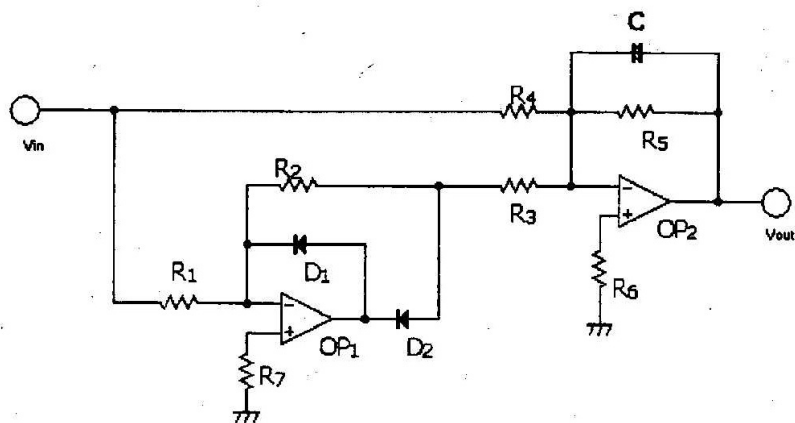


図 23 考察 5：絶対値増幅回路

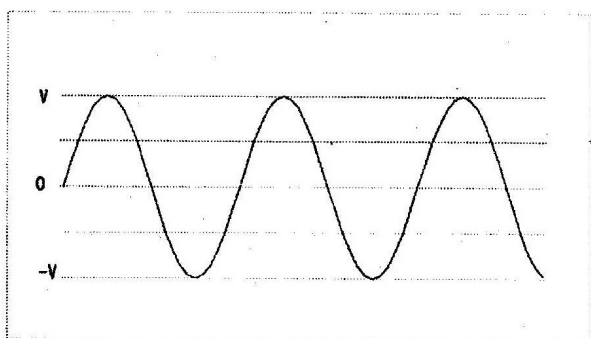


図 24 考察 5：入力信号

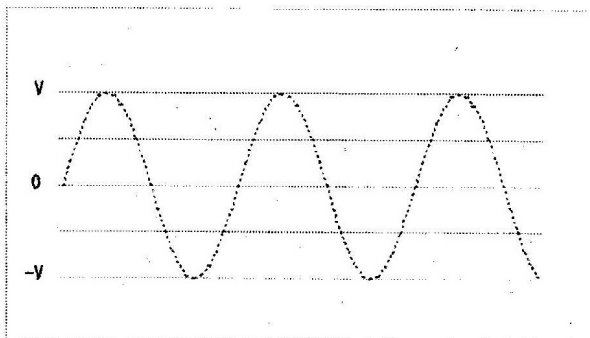


図 25 考察 5：出力信号

8 結論

1. OP アンプを用いると各種増幅回路や関数発生器を作ることができる。
2. 理想的な OP アンプと実際の動作には異なる点があり注意が必要である。
3. 最も基礎的な反転・非反転増幅回路では、バーチャルショートの方法を導入することで簡単に増幅率が計算できる。増幅率は OP アンプにつなぐ抵抗の比率で決定される。
4. 反転増幅回路は一定の増幅率を保ちながら極性を反転した出力を発生する。
5. 交流増幅回路の周波数特性は高周波数領域に近づくほど増幅率が減少する。

6. 絶対値増幅回路を用いると交流信号を整流することができる。
7. OP アンプを用いてローパスフィルタ・ハイパスフィルタを作ることができる。

9 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の6人と、丁寧に指導して下さった先生方・TAの方々に感謝申し上げたい。

10 参考文献

- 実験テキスト「A2. オペアンプによるアナログ回路設計」
- 「OP アンプ回路の設計」岡村勉夫 CQ 出版社 第3版
- 「絵ときでわかるオペアンプ回路」高橋寛監修 内山明治・村野寧共著 オーム社 第1版第9刷
- 「トランジスタ技術 2009 12 月号 『完全理解！トランジスタ回路』」CQ 出版社
- 「ルネサスエレクトロニクス 公式ホームページ」<http://japan.renesas.com/>
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第2版第1刷 第2編
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第4版」奥村晴彦著 技術評論社 第4版第6刷

以上