

2 . オペアンプ

1 目 的

本実験では、オペアンプを用いて基本的な回路を組立て、その特性測定を行う。これらの操作を通じてオペアンプの基礎的な知識と具体的な使い方を修得する¹。

2 理 論

2.1 オペアンプの特性

オペアンプ (Operational Amplifier ; 演算増幅器/OP アンプ、OP-AMP などと略すこともある) は、抵抗やコンデンサ、ダイオードなどと組み合わせることにより、各種の機能を持った回路を構成することが出来る応用範囲の極めて広いアナログのモノリシック集積回路 (IC) 素子である。例えば、この実験で使用する OP アンプ LM741 は、その等価回路が差動増幅入力段、カレントミラー定電流回路、レベルシフタ、エミッタ接地 (シングルエンド) 増幅段、コンプリメンタリ出力段等からなっており、25 個位のトランジスタで構成されている IC である。しかし、使用に当たっては内部の等価回路を気にする必要は無く、OP アンプをブラックボックス (Black Box) として取り扱い、その使用法のポイントを習熟することが大切である。

OP アンプはかなり理想的な増幅器に近い特性をもっている。理想的な増幅器の条件は次のとおりである。

1. 入力信号電流が流れ込まない (入力インピーダンスが無限大)。
2. 出力信号電圧は出力に接続される負荷の影響を受けない (出力インピーダンスがゼロ)。
3. 電圧利得 (差動電圧利得) が無限大である。
4. 直流から無限大の周波数まで増幅できる。
5. 雑音がない。
6. 入力が 0 のとき、出力が 0 である。

実際の OP アンプでは、初期に開発された汎用 LM741 のデータでは

入力インピーダンス (Z_{in}) : $2M\Omega$

出力インピーダンス (Z_{out}) : 75Ω

電圧利得 (A) : $106dB (2 \times 10^5 \text{ 倍})$

である。これらの値を見ても、OP アンプを理想アンプとして取り扱っても、ほとんど問題ないことがわかる。ただし、OP アンプの性能限界のところでは、十分に特性を考慮しなければならない。

実際の OP アンプの外観・ピン接続を LM741 の例で図 1 に示す。これは DIP 型と呼ばれ、もっとも良く使用される形状である。

図に示されているように、2つの入力端子に加わった電圧の差が増幅され、OP アンプは常に差動増幅器として動作する。

$$\text{出力電圧} = A \times (\text{非反転入力電圧} - \text{反転入力電圧})$$

また、入力電圧が直流あるいは交流でも動作する。

OP アンプを使用する際に着目すべきその性能を表す大切なパラメータがいくつかあるので、以下に簡単に示す。

¹注：実験を行う前に内容を十分に予習する必要がある。

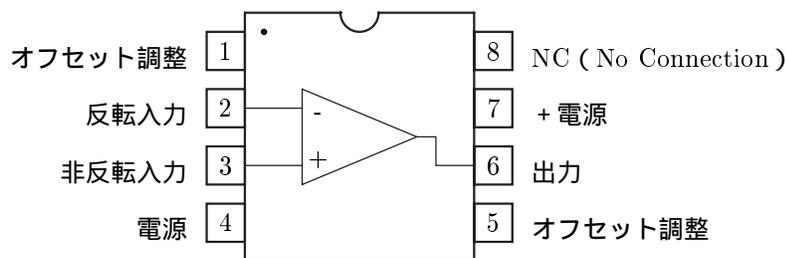
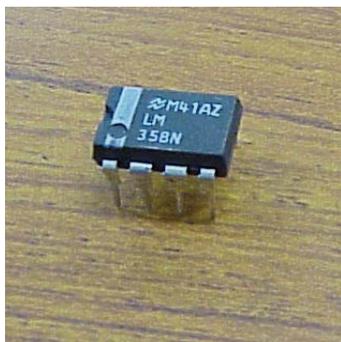


図 1: LM741 の外形とピン配置 (TOP VIEW)

2.1.1 入力オフセット電圧 (Input Offset Voltage)

理想的 OP アンプでは、入力端子を両方ともグラウンド電位にすると、出力電圧は 0 V になる。しかし、実際の OP アンプでは、これが 0 V にならない。これは、OP アンプ内部の差動トランジスタの平衡が完全にはとれていないことに起因する。逆に、出力電圧を 0 V にすると差動入力の間にある程度の直流電圧が残る。これを入力オフセット電圧といい、普通は数 mV 位である。

この誤差電圧を打ち消すために補償回路を付加する。汎用の OP アンプには零調整端子があるので、これに可変抵抗器を接続して出力電圧を 0 V に調整する。これを零調整、あるいはオフセット調整という。

入力オフセット電圧は、温度によってわずかながら変化し、その値は数 μV / 位である。

2.1.2 入力バイアス電流 (Input Bias Current)

理想 OP アンプの入力インピーダンスは無限大であるから、入力電流は流れない。しかし、現実のアンプは動作させるためにわずかな入力電流が流れる。この電流を入力バイアス電流 I_B という。LM741 は差動入力段にバイポーラトランジスタを使用しているため、約 80 nA の比較的大きな電流が流れる。FET 入力段タイプの OP アンプではこの値は非常に小さく数十 pA のオーダーが一般的である。

2.1.3 スルーレート (SR)

スルーレートは $1\mu\text{s}$ あたりに変化できる出力電圧の最大値を表す。これは、入力信号の変化に対して出力電圧が追従できる度合いを示したもので、OP アンプの使用できる周波数帯域内であっても、大振幅信号を取扱う場合はこの影響を受けるので考慮しなければならない。汎用の OP アンプ LM741 で $0.5\text{V}/\mu\text{s}$ 位である。図 2 の電

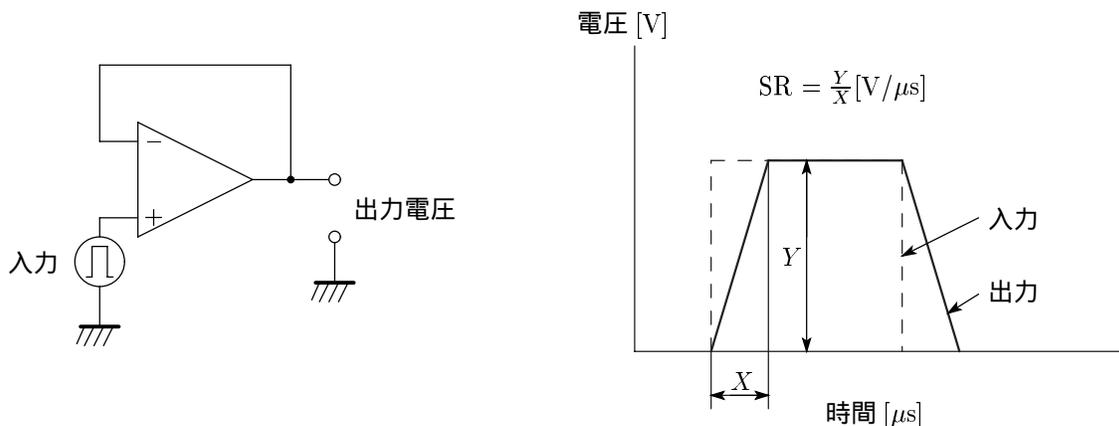


図 2: スルーレート SR

圧フォロワの入力に大振幅の方形波を入力して出力の波形を観測したのが同図の右側である。周波数が低い場合は出力波形も方形波であるが、周波数が高くなると波形がずれ、台形になる。波形がずれるのは、入力があったから出力するまでに時間がかかるためである。出力するまでに要する時間を表すのはスルーレートである。 $X[\mu\text{s}]$ 間に $Y[\text{V}]$ の出力があったときのスルーレート SR は

$$\text{SR} = \frac{Y}{X} [\text{V}/\mu\text{s}]$$

2.1.4 周波数特性

理想なオペアンプは、無限大の周波数まで増幅できるが実際のオペアンプで増幅できる周波数には限界がある。図 3(a) のように、負帰還（負フィードバック）をかけずオペアンプ入力電圧を一定にしておき、周波数を変化したときの増幅度の変化を開ループ周波数特性という。図 3 のグラフは、開ループ周波数特性の例である。オペアンプ規格表に載っている増幅度は直流の増幅度であり、周波数が高くなるに従って増幅度が小さくなる。図 3 で周波数が 10Hz のときの増幅度は 100 000、100Hz で 10 000、1kHz で 1 000 というように周波数が 10 倍になると増幅度が 1/10 になっている。この値を利得帯域幅積 (GB 積) という。

利得帯域幅積とは、周波数 f のときの OP アンプの電圧利得が A であったとすると、

$$\text{GB 積} = A \times f [\text{Hz}] \quad (1)$$

で表われ、一定の値をとる。GB 積は OP アンプの動作周波数を示す値である。このように、OP アンプの電圧利得は周波数幅に依存する。汎用の OP アンプでは、周波数が 10Hz 以下では、電圧利得は 1 0 0 dB (10⁵ 倍) 位もある。しかし、これより高い周波数では、約 2 0 dB/dec の傾で減衰する。尚、電圧利得が 0 dB (1 倍) となる周波数をユニティゲイン周波数といい、 f_T の記号で表すと、

$$\text{GB 積} \geq f_T [\text{Hz}] \quad (2)$$

とも表される。この GB 積の値は、汎用の OP アンプ LM741 で 1MHz 位である。

負帰還をかけて増幅度を 10、100、1 000 にした閉ループの周波数特性を図 3 のグラフに太い線で示す。測定原理図は図 3(b) である。周波数が低いときの増幅度は、負帰還抵抗 R_G 、 R_F の値で決まる一定値である。増幅度が一定である閉ループの周波数特性の直線と開ループの周波数特性の直線の交点の周波数を周波数帯域幅 f_W という。 f_W より高い周波数の閉ループの周波数特性は、開ループ周波数特性と同じにある。

GB 積は一定であるから、増幅度を大きくすると周波数帯域幅は小さくなり、周波数帯域幅を大きくすると、増幅度は小さくなる。

2.1.5 その他のオペアンプの特性について

このほかに注目すべきパラメータとして、入力オフセット電流 (Input Offset Current)、差動入力抵抗 (Differential Input Resistance)、差動入力容量 (Differential Input Capacitance)、同相信号除去比 (Common Mode Rejection Ratio CMRR) などがあるが省略する。

2.1.6 dB について

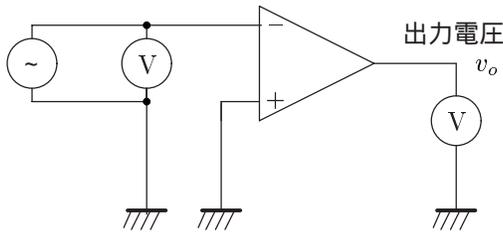
増幅器の増幅の程度を表すのに増幅度 A または利得 G (ゲイン) を使う。電圧増幅度の場合の増幅度は出力電圧 V_o と入力電圧 V_i の比で表す。

$$\begin{aligned} \text{増幅度} &= \frac{\text{出力電圧}}{\text{入力電圧}} [\text{倍}] \\ A &= \frac{V_o}{V_i} [\text{倍}] \end{aligned}$$

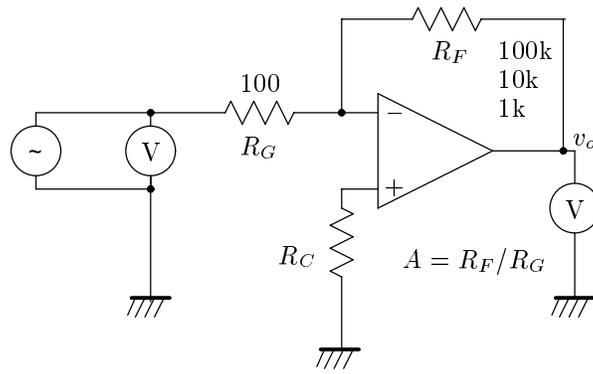
開ループ増幅度 $A_V = v_o/v_i$

周波数 f を変化

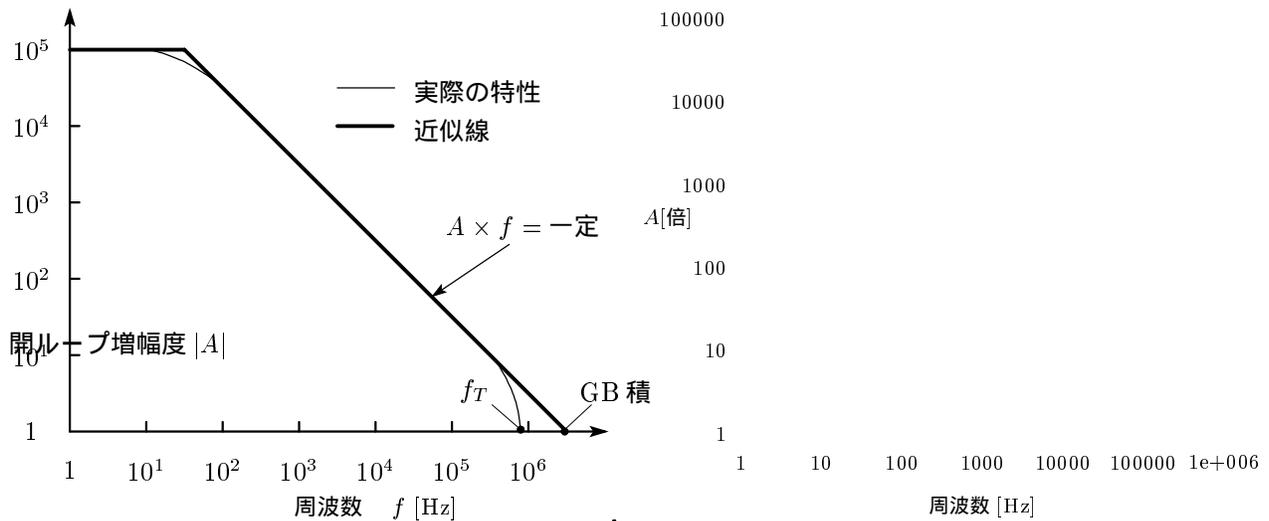
入力電圧 v_i 一定



(a) 測定原理図 (開ループ)



(b) 測定原理図 (閉ループ)



(c) 周波数特性 (開ループ)

(d) 周波数特性 (閉ループ)

図 3: OP アンプの周波数特性

増幅度 A と利得 G の関係は次式になり、利得の単位は dB (デシベル : decibel) である。

$$G = 20 \log A[\text{dB}] \quad (3)$$

$$= 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) [\text{dB}] \quad (4)$$

デシベルは増幅器の利得やフィルタの減衰率を表すのに便利な単位である。dB の主な値を暗記しておくとう便利
なことが多いので、図 4 および表 1 に示す。負の dB は減衰を表す。dB は log の値をとることから、比率の掛
け算は dB の足し算、割り算は dB の引き算となる。たとえば、10 倍は 20dB であるから、100 倍 = 10 × 10 は
20dB + 20dB = 40dB となる。このように、dB はよく使用されるので、その計算の方法を修得しておく必要が
ある。

dB と同様に、周波数が 2 倍になることを oct (オクターブ)、10 倍になることを dec (ディケード) と言う。し
たがって、6dB/oct は周波数が 2 倍になると電圧が 2 倍になることを示す。また、20dB/dec は周波数が 10 倍に
なると電圧が 10 倍になることを示す。

表 1: dB 表示と比率 (電圧)

電圧比 [倍]	1/10	1/√10	1/2	1/√2	1	√2	2	√10	10	100	1000	10000	100000	1000000
利得 [dB]	-20	-10	-6	-3	0	3	6	10	20	40	60	80	100	120

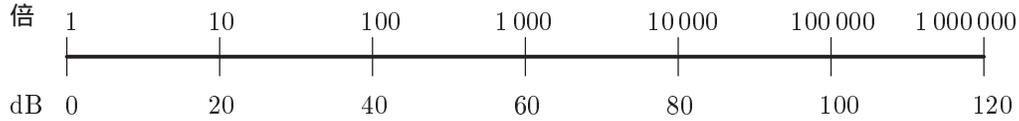


図 4: 増幅度 (倍) と利得 (dB)

2.2 OP アンプの基本回路

OP アンプの基本回路である反転増幅回路、非反転増幅回路、微分回路、積分回路について述べる。このほかに電圧フォロア回路、各種コンパレータ回路や対数増幅器回路等を略すが身につけていただきたい。

2.2.1 反転増幅回路 (Inverting amplifier circuit)

反転増幅器は、出力電圧信号の極性が入力電圧信号の極性と反対になる。このことにより、逆相増幅器ともいう。反転増幅回路を図 5 に示す。抵抗 R_1 は入力抵抗、抵抗 R_2 は帰還抵抗である。

増幅回路の回路方程式を求める場合、次に示すような OP アンプの特性を考慮すると簡単になる。

1. OP アンプにフィードバック回路を設ける (R_2 をつける) と、出力電圧が有限であることから 2 つの入力端子間の電位差は常に 0 V になるように決定される。これをイマジナリショート (Imaginary Short : 仮想短絡) という。
2. OP アンプの入力インピーダンスは非常に大きく、OP アンプには電流が流入しない。

これらの仮定により、入力と出力の関係を求めてみる。まず、OP アンプの入力の抵抗 R_1 に流れる電流は、反転入力の電圧がイマジナリショートの条件から非反転入力の電圧 (0V) と等しいことから、 V_i/R_1 となる。 R_2 に流れる電流は、同様に、 V_o/R_2 となる。OP アンプの入力段には電流が流れないことから、

$$\frac{V_i}{R_1} + \frac{V_o}{R_2} = 0 \quad (5)$$

となる。これより、伝達関数 G は

$$G = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

と求められる。この回路の入力インピーダンスは抵抗 R_1 に等しい。なお、 R_1 、 R_2 の代わりにインピーダンス Z_1 、 Z_2 を用いても上の関係が成り立つ。

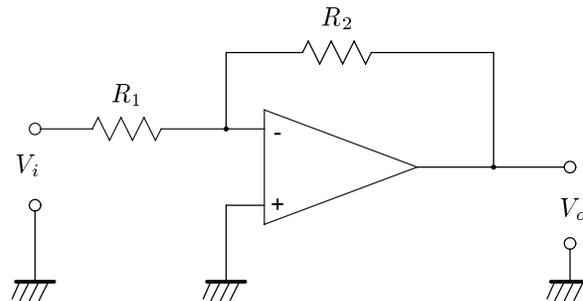


図 5: 反転増幅回路

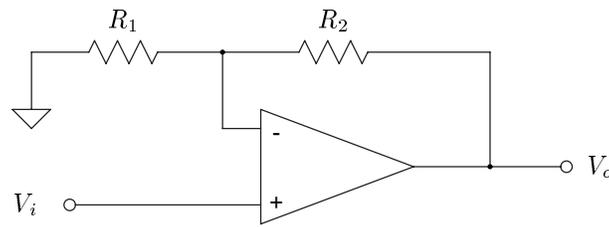


図 6: 非反転増幅回路

2.2.2 非反転増幅回路 (Noninverting amplifier circuit)

非反転増幅器は出力信号の極性が入力信号の極性と同じになる増幅器であり、正相増幅器ともいう。反転増幅回路は図 6 のようになる。回路方程式は、イマジナリーショートの状態から、反転入力電圧は非反転入力電圧 V_i と等しくならなければことから得られ、伝達関数 G は次式となる。

$$G = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

この回路の入力インピーダンスは、OP アンプの入力インピーダンスに等しくなる。従って、高入力インピーダンスの増幅回路が実現できる。

2.2.3 電圧フォロワ回路 (Voltage Follower)

電圧フォロワ回路を図 7 に示す。この回路は、非反転増幅器の伝達関数の式 (7) において、抵抗 R_1 を無限大とし、抵抗 R_2 を 0Ω にして、増幅度を 1 倍 (0 dB) としたものである。出力信号電圧は、入力信号電圧に追従するだけとなる。しかし、OP アンプの特性により、入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが低い回路となる。この回路を電圧フォロワ回路、または、インピーダンス変換回路ともいう。この回路を使用することにより、前段の回路の状態を乱すことなく後段の回路に信号を送ることができる。信号を取り扱う場合にたいへんに重宝な回路である。

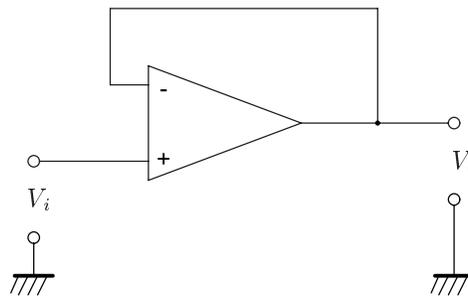


図 7: 電圧フォロワ回路

2.3 微分回路と積分回路

微分回路と積分回路は時間応答の演算を行う場合の基本回路である。これらを利用して、信号波形の変換を自由に行うことができる。もともと、OP アンプ (演算増幅器) と呼ばれたのはこのような演算ができることに由来している。

2.3.1 微分回路 (Differentiator)

微分器は、入力信号の時間微分に比例した出力信号を得ることができる。理想アンプを用いた微分回路を図 8(a) に示す。回路方程式は、反転増幅回路の場合と同様に考えて、イマジナリショートの状態より、

$$j\omega CV_i + \frac{1}{R}V_o = 0 \quad (8)$$

となる。これより、周波数領域の出力電圧は

$$V_o(j\omega) = -j\omega RCV_i(j\omega) \quad (9)$$

となる。符号は入力電圧の信号が出力電圧に対して反転していることを示している。また、 j は虚数を表す記号であり、 ω は角周波数 ($\omega = 2\pi f$) である。

$j\omega$ はラプラス変換の s に等しい。したがって、これは微分を表す。これにより、時間領域での出力電圧は

$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt} \quad (10)$$

となる。したがって、回路は微分の演算をすることがわかる。

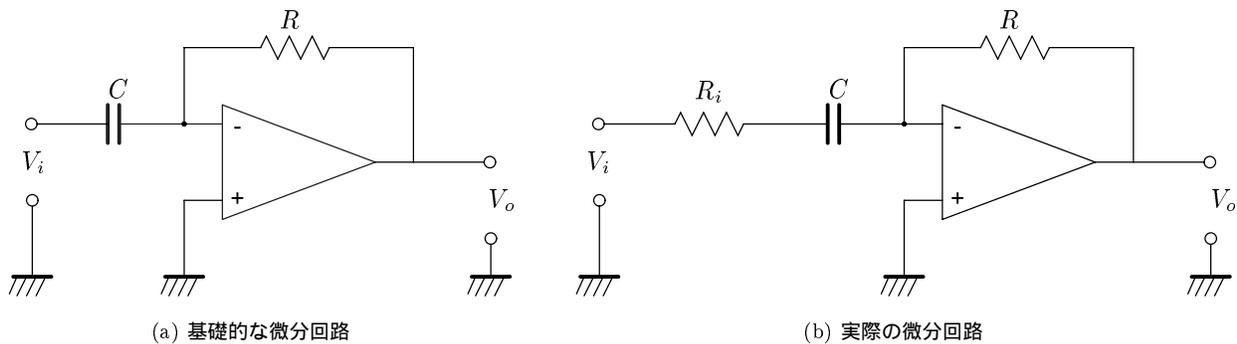


図 8: 微分回路図

この回路は、高い周波数域においてはコンデンサ結合の交流増幅器とみなされる。コンデンサ C のインピーダンスが帰還抵抗 R と等しくなる所で、増幅度は 1 倍 (0dB) となる。その周波数は式 (9) より、

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

である。入力信号の周波数が 2 倍になればコンデンサのインピーダンスは $1/2$ 倍となるから、出力電圧は 2 倍になる。すなわち、6dB/oct の特性をもつ回路となる。

しかし、実際の OP アンプでは利得帯域幅積 (GB 積) の制限がある。その周波数特性は -6dB/oct であるから、微分回路の周波数特性と交差するところがある。そうすると、回路の状態が不安定となり発振のおそれがある。そこで、コンデンサに直列に抵抗 R_i を接続して、高い周波数域でコンデンサのインピーダンスが低下しても回路の利得が高くないようにする (図 8(b))。この入力抵抗 R_i により、いくらコンデンサ C のインピーダンスが低下しても回路の増幅度は R/R_i 以上にはならない。このときの周波数は

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_i C} \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

である。つまり、微分器として働くのは周波数 f_2 までで、それ以後は交流増幅器として働き、高い周波数帯域では OP アンプの利得帯域幅積 (GB 積) の制限を受ける。

つぎに、微分器に正弦波 $\sin \omega t$ を入力した場合の波形応答を考える。

このとき、出力電圧は式 (9) より

$$V_o(t) = -RC \frac{d \sin \omega t}{dt} = -\omega RC \cos \omega t \quad (13)$$

と求まり、正弦波を余弦波に変換できる。

2.3.2 積分回路 (Integrator)

積分器は、入力信号の時間積分に比例した出力信号を得ることができる。積分は微分の反対の演算をする。回路も同じで微分回路の抵抗 R とコンデンサ C を入れ替える。理想アンプを用いた積分回路を図 9(a) に示す。

周波数領域の出力電圧は、微分回路と同様に考え

$$V_o(j\omega) = -\frac{1}{j\omega RC}V_i(j\omega) \quad (14)$$

となる。 $1/j\omega$ はラプラス変換の $1/s$ に等しく、これは積分を表す。これより、時間領域での出力電圧 V_o は

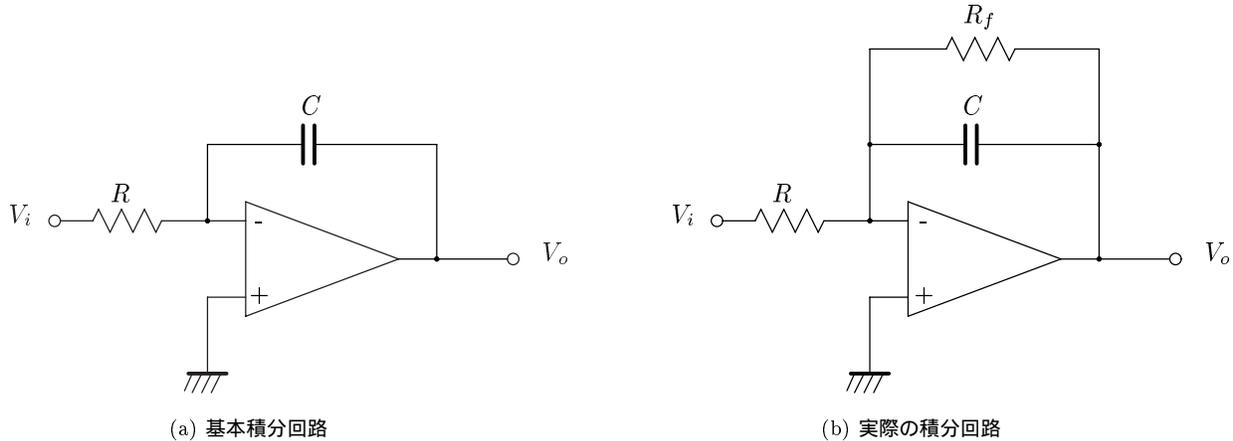


図 9: 積分回路

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt \quad (15)$$

となる。入力信号の周波数が 2 倍になれば、コンデンサ C のインピーダンスは $1/2$ 倍となる。コンデンサは帰還回路にあるので出力電圧が $1/2$ 倍になる。すなわち、 -6dB/oct の特性をもつ。OP アンプの開ループ利得を A とすれば、コンデンサのインピーダンスと抵抗との比が開ループ利得と等しくなる周波数 f_1 は

$$f_1 = \frac{1}{2\pi ARC} \quad [\text{Hz}] \quad (16)$$

である。この周波数から -6dB/oct の傾きで増幅度が下がる。そして、コンデンサのインピーダンスが抵抗と等しくなるところで増幅度は 1 倍 (0dB) となる。そのときの周波数を f_3 とすると、

$$f_3 = \frac{1}{2\pi RC} \quad [\text{Hz}] \quad (17)$$

である。

実際の積分回路を図 9(b) に示す。実際の積分回路では、周波数 f_1 以下のところでは開ループの状態のようになり回路が不安定となるから、コンデンサ C に並列に帰還抵抗 R_f を接続して低い周波数域における増幅度を制限する。

積分器としての動作が制限される周波数 f_2 は

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_f C} \quad [\text{Hz}] \quad (18)$$

である。つまり、積分器として動作するのは周波数 f_2 から f_3 までで、周波数 f_2 より低い周波数域は増幅度が R_f/R の増幅器として働く。つぎに、時間領域における積分器の波形応答例として、方形波入力の場合を考える。図 10 に示す周期 $T = T_1 + T_2$ 、最大値が $\pm V$ の方形波を考える。期間 T_1 のとき、方形波の電圧は $+V$ の一定値であるから、式 (15) より、出力電圧 $V_o(T_1)$ は

$$V_o(T_1) = -\frac{1}{RC} V \times T_1 \quad (19)$$

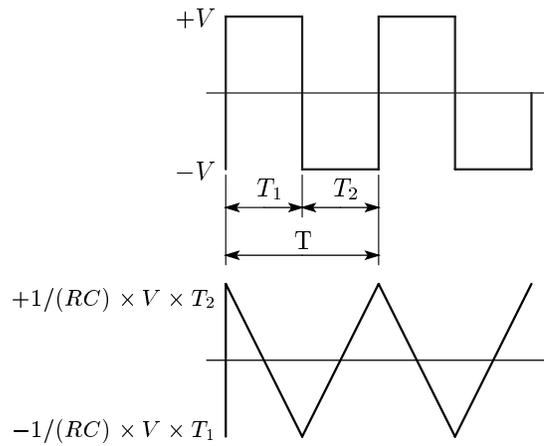


図 10: 方形波の積分

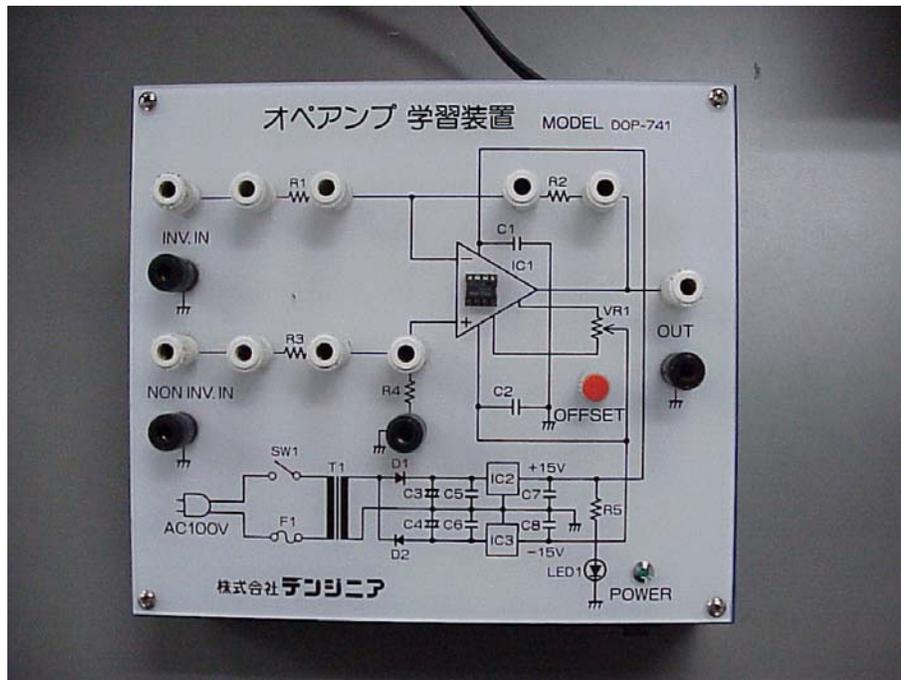


図 11: オペアンプ学習装置の外観

となる。

同様に、期間 T_2 のとき、方形波の電圧は $-V$ の一定値であるから、出力電圧 $V_o(T_2)$ は

$$V_o(T_2) = +\frac{1}{RC}V \times T_2 \quad (20)$$

となる。つまり、方形波を三角波に変換できる。

3 実験

図 11 に OP アンプ学習装置の外観を示す。抵抗 $R_1 \sim R_4$ は配線されておらず、ここの部分に抵抗・コンデンサを外付けすることにより、反転増幅回路、非反転増幅回路、微積分回路等の実験回路を個別に組み立てることができる。反転入力 (INV.IN) 端子はこの装置を反転増幅器として特性測定する場合の入力端子である。非反転入力 (NON INV.IN) 端子は非反転増幅器用である。白色端子が信号線のホット側、黒色端子がアース側 (コールド側) である。同装置には、電源回路、バイパスコンデンサ、電源スイッチ、パイロットランプ、オフセット調整

用ボリュームがある。

次に、図 12 に特性測定実験のために用いる低周波発振器、電圧計 2 台、オシロスコープと学習装置との結線の様子を示した。学習装置の入力部分には信号ケーブルが集中するので、バナナプラグケーブルや矢型プラグケーブルをうまく使って結線する必要がある。

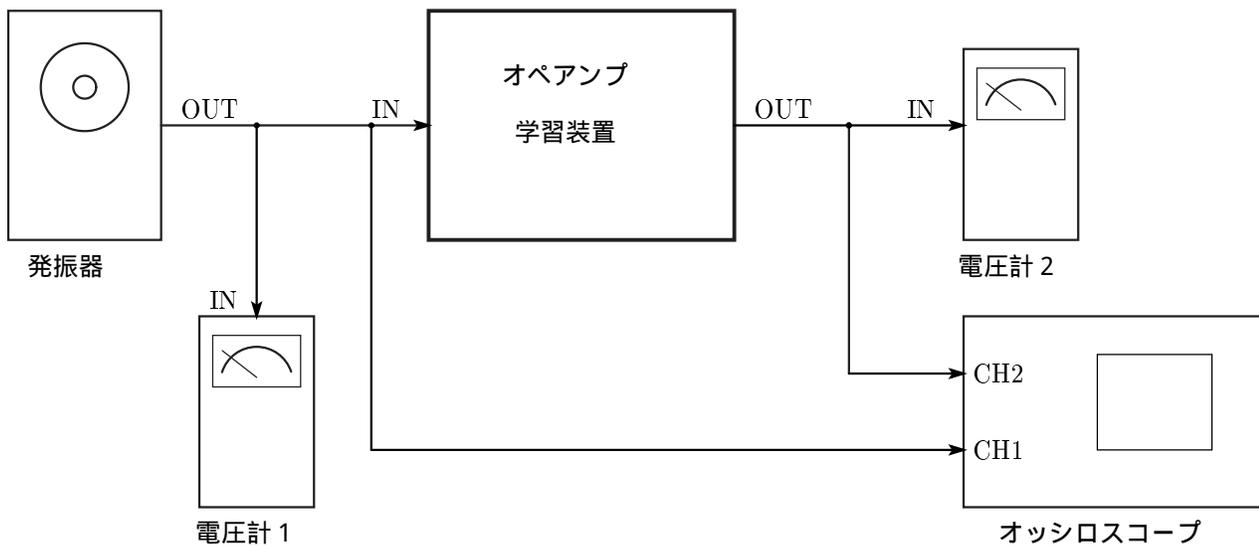


図 12: 結線図

3.1 反転増幅器の周波数特性測定

反転増幅回路の実験回路を図 13 に示す。この回路を OP アンプ学習装置に組み立て、その周波数特性を測定する。測定機器の接続は図 12 を参照せよ。

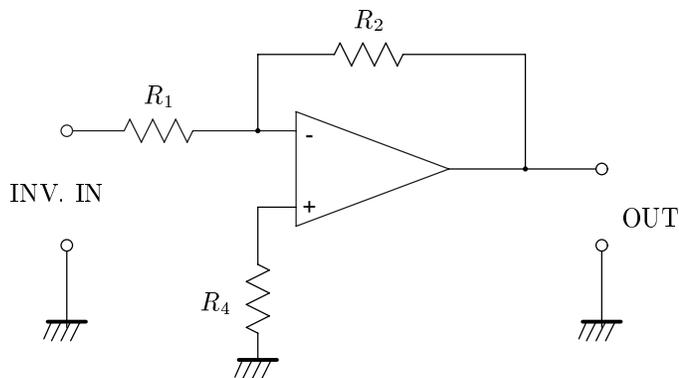


図 13: 実験反転増幅回路

1. 発振器の出力電圧は正弦波信号 10mV 一定とする。周波数を変えたとき、発振器の出力電圧を微調整して常に正確に一定値に保つこと。測定周波数は次の通りである。

周波数 [kHz]	0.1	1	3	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	250	500	
出力電圧 [V]																					
増幅度 [dB]																					

2. 周波数 1kHz のときのオシロスコープ画面上の入出力電圧波形をプリントアウトする。このとき 2~3 周期の波形を画面に出すこと。
3. 増幅度は dB で計算すること。

3.2 非反転増幅器の周波数特性測定

非反転増幅回路図を図 14 に示す。この回路を OP アンプ学習装置に組み立て、その周波数特性を測定する。

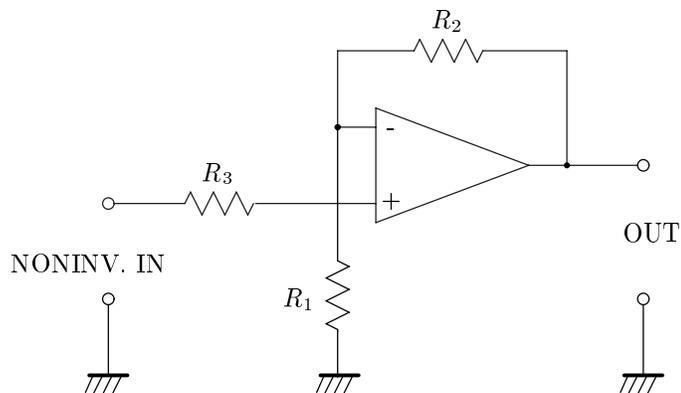


図 14: 実験非反転回路

1. 入力電圧は正弦波信号 100mV 一定とし、周波数を変化させ出力電圧を測定する。測定周波数は次の通りである。

周波数 [kHz]	0.1	1	3	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	250	500	
出力電圧 [V]																					
増幅度 [dB]																					

2. 周波数 1kHz のときのオシロスコープ画面上的の入出力電圧波形をプリントアウトする。このとき 2~3 周期の波形を画面に出すこと。測定中は、常にオシロスコープ画面上的の波形に注意すること。
3. 増幅度は dB で計算すること。

3.3 微分回路

微分回路図を図 15 に示す。この回路をオペアンプ学習装置に組み立てる。

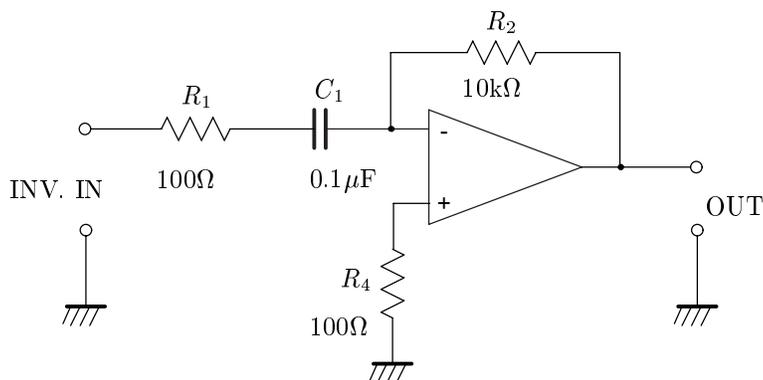


図 15: 微分器実験回路

1. 発振器の正弦波信号の周波数を 500Hz とし、振幅を 1V とする。
2. オシロスコープ画面上的の入出力電圧波形をプリントアウトする。このとき 2~3 周期の波形を画面に出すこと。
3. 周波数を 16kHz とし、振幅を 20mV とする。2 を行え。

注： 抵抗の抵抗値はカラーコードで表示されている。付録の「カラーコード表示の見方」を参照し、抵抗値を読み取り、テスターで値を確認すること。

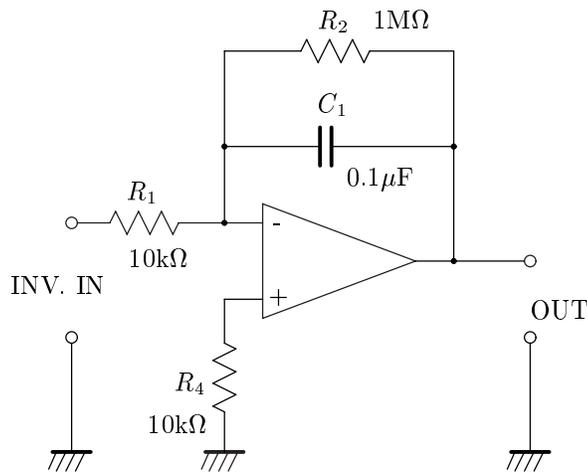


図 16: 積分器実験回路

3.4 積分回路

積分回路図を図 16 に示す。この回路を OP アンプ学習装置に組み立てる。

1. 発振器の方形波信号の周波数を 100Hz とし、入力電圧を $\pm 1V$ とする。
2. オシロスコープ画面の上の入出力電圧波形をプリントアウトする。このとき 2~3 周期の波形を画面に出すこと。

注： 抵抗の抵抗値はカラーコードで表示されている。付録の「カラーコード表示の見方」を参照し、抵抗値を読み取り、テスターで値を確認すること。

4 実験結果に対する課題

1. 実験 3.1 で用いた抵抗の値を求めよ。ただし、 R_1 を $1k\Omega$ とし、 R_4 の値は R_1 と R_2 の並列値である。 $V_i=10mV$ 、 $V_o=1V$ とする。
2. 実験 3.2 で用いた抵抗の値を求めよ。ただし、 R_1 を $1k\Omega$ とし、 R_3 の値は R_1 と R_2 の並列値である。 $V_i=100mV$ 、 $V_o=1V$ とする。
3. 周波数特性（実験 3.1、実験 3.2）の測定結果を片対数グラフに表すこと。
4. 周波数特性の実験結果（実験 3.1、実験 3.2）のそれぞれの遮断周波数を求め、比較せよ。
5. 周波数特性の実験結果（実験 3.1、実験 3.2）のそれぞれの GB 積の値を求め、比較せよ。
6. 実験 3.3 において増幅度が 0dB になる周波数を求めよ。また微分回路として働く周波数の上限を求めよ。
7. 積分回路の実験 3.4 において、積分時間 $T_1[T_2]$ の期間での出力電圧 $V_o(T_1)[V_o(T_2)]$ を求めよ。
8. 実験 3.3 および実験 3.4 のそれぞれの入出力波形について考察せよ。それぞれの出力電圧の理論値を示せ。

5 問題

1. イマジナリショートを用いて式 (7) を導出せよ。
2. CMRR とはなにか、調べよ。

3. 実験で用いた微分回路の周波数特性について述べよ。

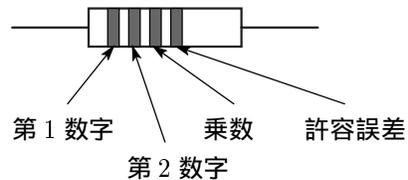
4. 実験で用いた積分回路の周波数特性について述べよ。

付録

抵抗のカラーコードの見方

色別	数字	数字	乗数
黒色	0	0	10^0
茶色	1	1	10^1
赤色	2	2	10^2
橙色	3	3	10^3
黄色	4	4	10^4
緑色	5	5	10^5
青色	6	6	10^6
紫色	7	7	10^7
灰色	8	8	10^8
白色	9	9	10^9

色別	許容誤差
金色	5%
銀色	10%
無色	20%



参考文献

- [1] J. Graeme, G. Tobey, and L. Huelsman (Eds.): *Operational Amplifiers*, McGraw-Hill Book Company-Singapore (1981).
- [2] 岩澤孝治、大三宗康：「見方・かき方 オペアンプ回路」、オーム社（2004）。