

オペアンプの基本特性と応用実験（共通実験 III）

1 まえがき

計測装置、コンピュータなど多くの電気電子機器がある中で、性能、コスト、耐ノイズ性などからデジタル回路が多く採用されてきている。しかしながら物理量はアナログであり、デジタルの電気電子機器とはどこかでアナログ回路を用いていることが多い。

本実験では、アナログ回路の基礎となるオペアンプ (Operational Amplifier: 演算増幅器) の基本動作である線形増幅回路とその簡単な応用であるアクティブフィルタを通してオペアンプを用いたアナログ回路の基礎を学ぶ。

2 オペアンプの基本特性

2.1 イマジナリショート

電気回路関係の講義では、受動素子と呼ばれる、抵抗、コンデンサ、コイルの組合せで複素インピーダンスなどを学んだが、受動素子だけではエネルギーが失われてしまう。増幅するためにトランジスタを用いると、増幅特性が非線形であるために思うような特性の回路を組むことができない。それに対してオペアンプは以下に示すような理想的な増幅器に近い性能を有している。

1. 入力抵抗が ∞ 。
2. 出力抵抗が 0。
3. 増幅度が大きく、しかも任意に変えることが可能。
4. 入出力特性の線形性が良い。
5. 周波数帯域が広い。

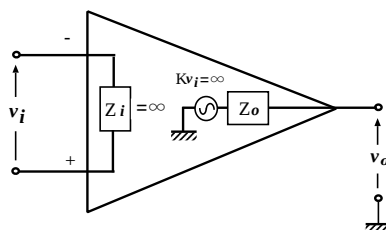


図 1: オペアンプの等価回路

そこで、 $Z_i = \infty$ 、 $Z_o = 0$ 、 $K = \infty$ と仮定すると、図 1 のように表すことができる。このとき、出力電圧 v_o は $v_o = Kv_i$ であるから、変形して $v_i = \frac{v_o}{K}$ となる。増幅率 $K = \infty$ であるから $v_i = 0$ となって、みかけ上反転入力端子 (-) と非反転入力端子 (+) との間があたかも短絡しているように動作するので、この現象を イマジナリショート という。

2.2 基本増幅回路

図 2 は最も基本となる 反転増幅回路である。 R_1 に流れる電流 i_s は、 $Z_i = \infty$ であるので、そのまま R_2 に流れる。イマジナリショートを考慮すると、

$$v_i = i_s R_1, \quad v_o = -i_s R_2$$

したがってこの回路全体の電圧増幅度 K は

$$K = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

となる。出力電圧が入力電圧の逆符号になるために 反転増幅回路とよばれる。

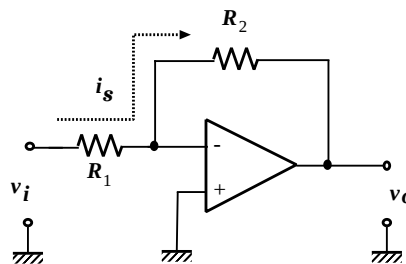


図 2: 反転増幅回路

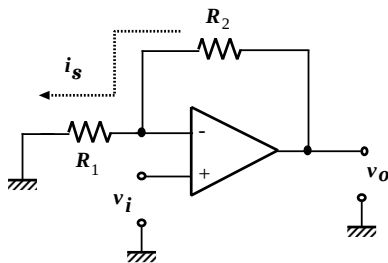


図 3: 非反転増幅回路

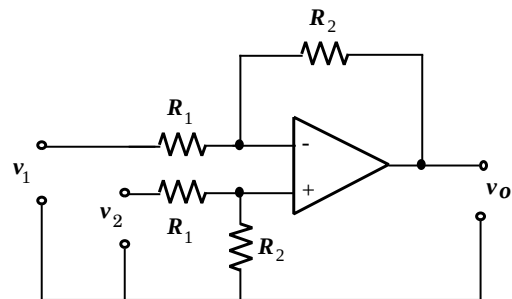


図 4: 差動増幅回路

[課題 1]: 図 3 の非反転増回路においても、反転増幅器のようにイマジナリショートを利用して入出力の電圧増幅度を求めてみよ。

[課題 2]: 図 4 の差動増幅回において、出力電圧 v_o を入力電圧 v_1, v_2 で表せ。

3 アクティブフィルタ

3.1 利得 (ゲイン) と dB (デシベル)

オペアンプを用いると、微小電圧を数千倍に増幅することができる。そのようなときに電気回路では増幅率 (倍率) ではなく、利得 (ゲイン)[dB] を用いる。増幅率 $K = \frac{v_o}{v_i}$ をゲイン G [dB] への

換算式は

$$G = 20 \times \log_{10} \frac{v_o}{v_i} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

と表される¹。このデシベル [dB] を使うことで、増幅率 数万倍から縮小倍率 1/数万倍までを扱うことができる。

3.2 アクティブフィルタの種類

電気回路におけるフィルタとは、周波数の大きさによって信号を振り分けるものをいう。入力を一定にして、フィルタを通すことによって特定の周波数成分を除去したり、逆に増幅したりすることができる。基本的には 4 つの形がある。

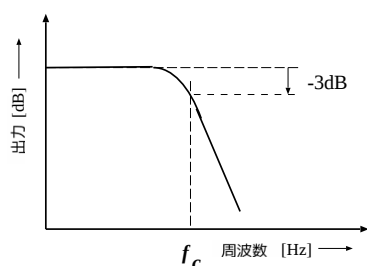


図 5: 低域通過型 (LPF) の特性

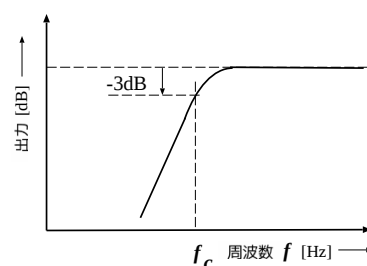


図 6: 高域通過型 (HPF) の特性

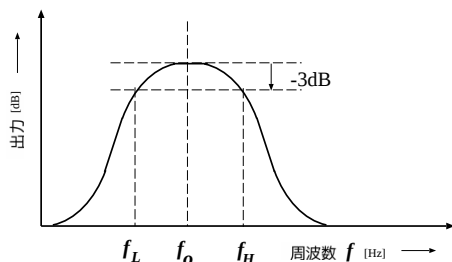


図 7: 帯域通過型 (BPF) の特性

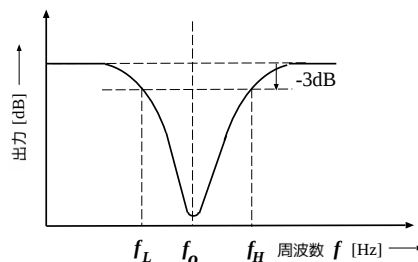


図 8: 帯域消去型 (ノッチフィルタ) の特性

オーディオのイメージとしては、LPF は低音を効かせ、HPF は高音を効かせるトーンコントロール、BPF と BEF は特定の周波数帯を強調したり抑えたりするグラフィックイコライザのようなものだと考えるとわかりやすいだろう。

各図において、 f_c は遮断周波数 (カットオフ周波数)、 f_o は中心周波数、 $f_H - f_L$ は帯域幅、また遮断特性の急峻さの指針として

$$Q = \frac{f_o}{f_H - f_L}$$

と定義して、これを回路の Q とよんでいる。Q の値が大きい程急峻になる。

[課題 3]: 遮断周波数や帯域幅では $-3[\text{dB}]$ という数字が意味をもっている。利得から倍率に変換するとおおよそどのくらいか。

¹ 制御工学におけるボード線図のゲイン線図と同じ。

3.3 オペアンプによるアクティブフィルタ

実際のオペアンプを用いたアクティブフィルタの回路図を示す。性能は必ずしも良くない。

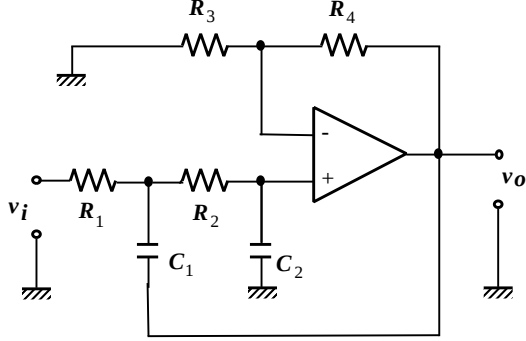


図 9: LPF 回路

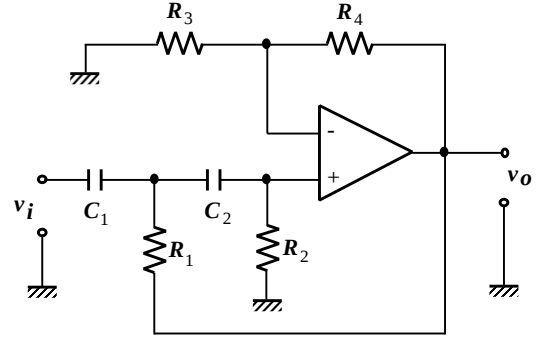


図 10: HPF 回路

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2} \sqrt{R_1 R_2}}$$

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad Q = \frac{1}{3 - K}$$

$$R_1 = \frac{1}{2}R_2, \quad C = C_1 = C_2, \quad R_3 = R_4$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2} \sqrt{R_1 R_2}}$$

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad Q = \frac{1}{3 - K}$$

$$R_1 = R_2, \quad C_2 = \frac{1}{2}C_1, \quad R_3 = R_4$$

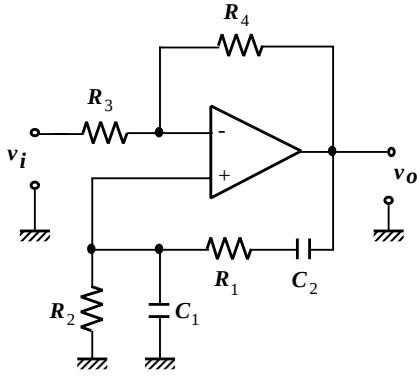


図 11: BPF 回路

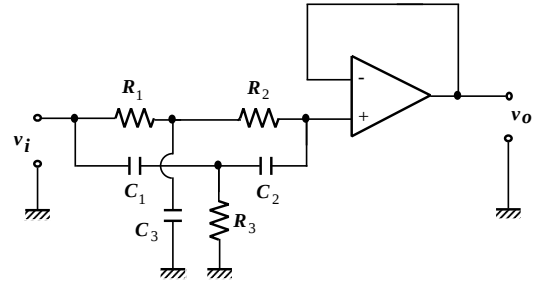


図 12: BEF 回路

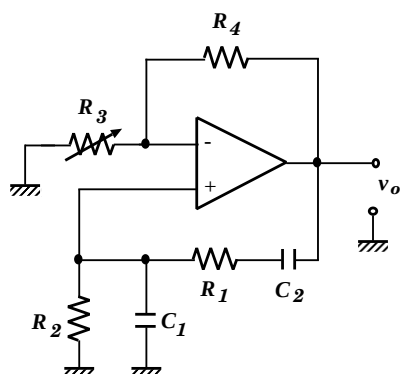
$$f_o = \frac{1}{2\pi CR}, \quad Q = \frac{1}{2 - R_4/R_3} < 3$$

$$R = R_1 = R_2, \quad C = C_1 = C_2$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi CR}, \quad R_3 = \frac{R}{2}$$

$$R = R_1 = R_2, \quad C = C_1 = C_2, \quad C_3 = 2C$$

3.4 発振器としてのオペアンプ



$$f_o = \frac{1}{2\pi C_m R_m}, \quad \frac{R_4}{R_3} = 2$$

$$R_m = \sqrt{R_1 R_2}$$

$$C_m = \sqrt{C_1 C_2}$$

図 13: 正弦波発振器

発振器としてもオペアンプが使われる。ただし汎用オペアンプでは高い周波数は達成できない。正弦波発振器では、可変抵抗で増幅度を微妙に調整しないときれいな発信はされない。

4 実験

実験で使用するブレッドボードはオペアンプを3回路有しており、電源電圧 (± 15 V) は内部で結線されている。はパナナクリップをさすことができる。[数字] は抵抗、コンデンサ、ダイオードなど付属の素子を挿入できる場所で、 が線で結ばれているところは結線されている。オペアンプにはオフセット調整用可変抵抗がついている。可変直流電圧出力 (-2 V $\sim$ $+2$ V)、直流電圧出力 (± 15 V) などが付属されている。ブレッドボードの配線図は予習書を参照のこと。

付属抵抗 : 510 Ω , 5.1 k Ω , 33 k Ω , 100k Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , 51 k Ω , 150 k Ω

コンデンサ : 0.0047 μ F, 0.047 μ F, 0.47 μ F, 0.01 μ F, 0.1 μ F

その他の実験装置 : オシロスコープ (2ch) , 発振器 , テスター

4.1 実験 : 反転増幅回路の直線性と飽和特性

1. 反転増幅回路 (図 2) を組む。抵抗値は増幅度 $K = 10$ 以上になるように定める。
2. ブレッドボードの電源を入れる。
3. 入力電圧を適当に変えていって、入力と出力の電圧をオシロスコープで測定し、配布されたグラフ用紙にグラフを描く。倍率が 10 倍以上ならば、出力電圧に飽和が起こる。

4.2 実験 : アクティブフィルタ

1. LPF(図 9)、HPF(図 10)、BPF(図 11) または BEF(ノッチフィルタ)(図 12) のどれか一つを選び、回路にしたがって抵抗、コンデンサをボード上に結線し、入力には正弦波発生器を接続。オシロスコープの 1CH は入力、2CH は出力とする。

2. 自分で定めた抵抗、コンデンサの値から、カットオフ周波数 (f_c [Hz]) または中心周波数 (f_o [Hz]) を予習書で計算しておく。ファンクションジェネレータは 10 Hz 以上でないと発振できないため f_c, f_o は 1000 Hz 以上にする。
3. 入力波形は正弦波とし、カットオフ周波数または中心周波数を中心にファンクションジェネレータの周波数を変化させ、周波数ごとの入出力波形の振幅 [V] を測定し、それを電卓で計算してゲイン [dB] で表す。その数値が、各フィルタになっていることを確認する。
4. 配布された片対数グラフ用紙に、横軸：周波数 [Hz]、縦軸：ゲイン [dB] をプロットすること。縦軸の範囲は実験に合わせて適当に選ぶこと。

4.3 実験：正弦波発振器

1. 正弦波発振器 (図 13) の回路を組む。 $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ にし、 R_3 は可変抵抗にする。
2. 出力のみをオシロスコープに接続し、可変抵抗を微妙に調整して出力を発振させ、最もきれいな正弦波になったところで、オシロスコープの画面を固定する。
3. オシロスコープから発振周波数を測定し、設計値と比較する。
4. 可変抵抗を変化させていったときのオシロスコープの波形の変化をスケッチする。

5 予習書

テキストの予習書部分を 2 枚コピーし、アクティブフィルタ (自分が選んだもの) と発振器の実験のための結線を色付でわかりやすく示しなさい。抵抗、コンデンサの値を実験装置にある値から選び、カットオフ周波数や中心周波数などの計算をしておきなさい。10 k Ω の半分には 5.1 k Ω を用いる。詳しくは E24 系列を調べてみよ。可変抵抗は 10 k Ω 、30 k Ω も使って良い。

6 レポート

レポートの〆切は原則として実験実施翌週の月曜日の 10:50。指定された場所に遅れないように提出すること。

提出グラフ：反転増幅回路の入出力グラフ (方眼紙) 1 枚、アクティブフィルタの入出力グラフ (片対数グラフ用紙) 1 枚

その他提出物：課題 1, 2, 3、考察、予習書 (2 枚)、実験時に配布されたプリント (2 枚)、実験に関する自由調査

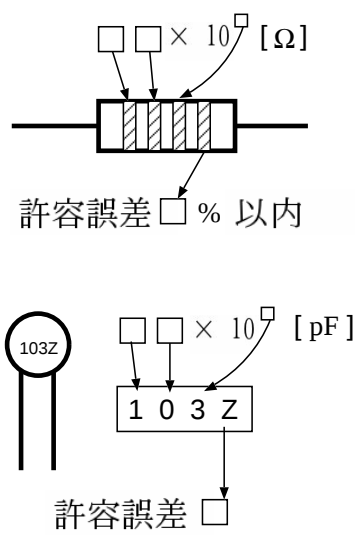
実験結果の考察を重視する。オペアンプの基本的な教科書を参考にするとよい。

アナログブレッドボードの注意事項

- 1. バナナクリップコードの抜き差しでは、コードを引っ張らない。
- 2. 抵抗、コンデンサ、バナナクリップコードなどの配線を確認してから、電源を入れる。
- 3. 回路を組み直すときは、必ず電源を OFF にしてから行う。
- 4. 直流電源 (±15 v, ±2 v) を絶対にショートさせない。
- 5. 実験終了後は、抵抗、コンデンサなどははじめの位置にきちんと戻し、バナナクリップコードは整理して箱に収める。
- 6. オシロスコープのプロープのアース線 (ミノムシクリップ) は、切断しやすいので注意して扱うこと。
- 7. 各実験に必要な装置だけを机の上に置いて実験をし、使わなくなった実験装置は元あったようにきれいに片付けること。
- 8. アナログテスターは必ずレンジを OFF にしてから片付けること。

抵抗値とコンデンサ値の読み方

抵抗、コンデンサなどは小さな部品のため、その値は色または簡略化された数字で表記されている。これは世界共通である。



抵抗のカラーコード

黒	茶	赤	橙	黄	緑	青	紫	灰	白
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

抵抗許容誤差のカラーコード

金	銀	無色
±5%	±10%	±20%

コンデンサの許容誤差

J	K	M	Z
±5%	±10%	±20%	+80, -20 %

図 13: コードの読み方

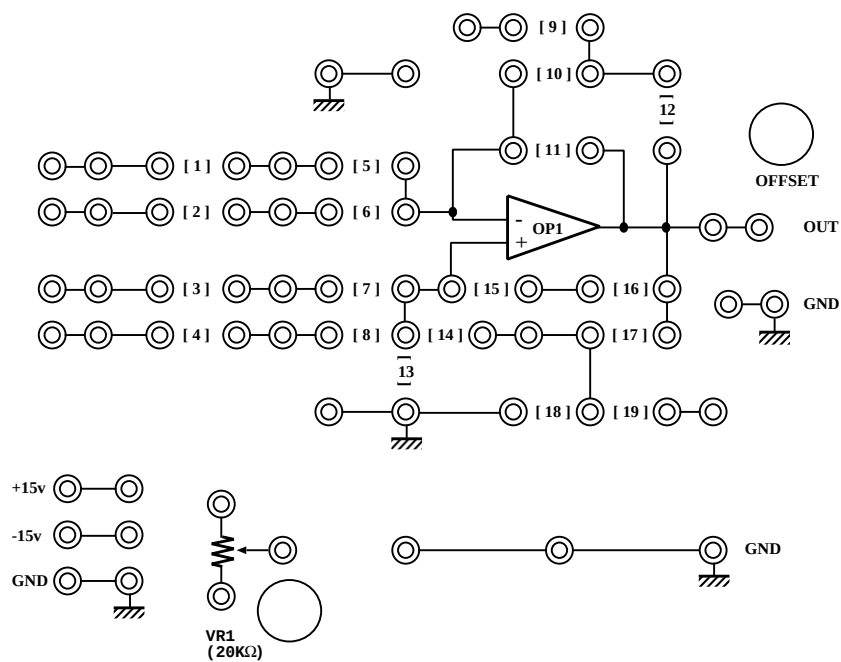
提出先：5113 室ポスト

共通実験 III 予習書

提出日： 年 月 日 班 組 番号 名前 _____

回路名： _____

使用抵抗： _____ 使用コンデンサ： _____



計算値 (遮断周波数 f_c または中心周波数 f_o)