

三角波発生回路の製作

最終更新 2018.6.25
奈良教育大学 藪 哲郎

1. 目的

三角波発生回路の製作を通じてオペアンプの使い方をマスターする。

2. 理論解説

2.1 発振回路とは

正弦波、ノコギリ波、方形波、三角波などの周期波形を発生させる回路を発振回路という。本実験では三角波発生回路を製作する。

なお、方形波やノコギリ波を発生させる場合、NE555 あるいはその互換 IC を使うと、IC 一個で発振回路が実現できる。555 は定番と言える便利な IC なので、覚えておくと良い。

本実験ではオペアンプを 2 個使って構成するシンプルで分かりやすい三角波発生回路を扱う。

2.2 オペアンプの基本特性

オペアンプ (Operational Amplifier : 演算増幅器) は、もともとアナログ計算機用に開発された IC である。加算・減算・乗算・積分・微分などの演算回路を実現することができる。現在では、アナログ計算機は使われなくなったが、オペアンプは増幅をはじめとして様々な用途に使える便利な IC として、電子回路に不可欠な素子となっている。

オペアンプは 2 つの入力端子と 1 つの出力端子を持ち、図 1(a) のような記号で表される。これ以外にオペアンプにエネルギーを供給するための電源端子が 2 個あるので (通常は回路図から省略される) オペアンプは最低 5 個の端子を持つ。

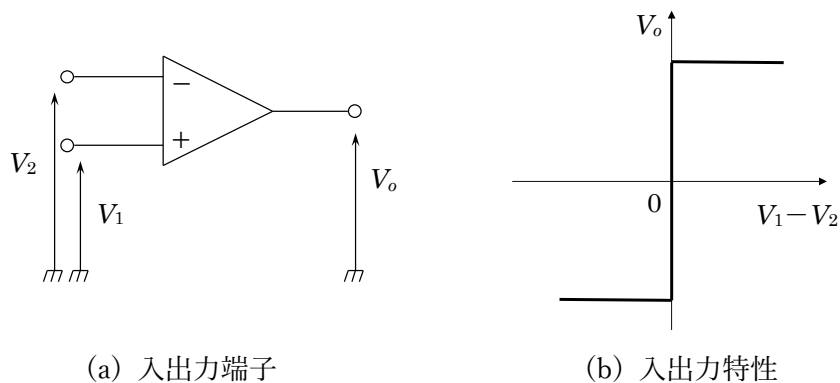


図1 オペアンプの基本特性

オペアンプを含む回路の構成法として、単電源（+と GND の 2 個の端子を持つ普通の電源）を用いる方法と両電源（±電源とも言う。+, GND, - の 3 個の端子を持つ電源）を用いる方法がある。本実験では数式が簡単になり、理解しやすい両電源を用いる回路構成法を用いる。

オペアンプを両電源で駆動する場合、各端子の電圧は以下の関係がある。

$$V_o = A_v(V_1 - V_2) \quad (1)$$

ここで、 V_o は出力電圧、 V_1 は非反転入力電圧、 V_2 は反転入力電圧、 A_v はオペアンプの電圧利得である。オペアンプの電圧利得 A_v は非常に大きく、通常は 10 万倍以上ある。

ここでは両電源を用いてオペアンプを駆動するので、式(1)における V_o , V_1 , V_2 は±両方の値をとらう。

2 端子の直流安定化電源は 3 万円程度なのに対して、3 端子の直流安定化電源（±電源）は 10 万円程度する。本実験では安価に済ませるため、9V の充電式電池を用い、TLE2426 という分圧用 IC を用いて、+4.5V, 0V, -4.5V の電圧を得る。

電源電圧が ±15 V のとき、オペアンプの出力は ±13 V 程度の範囲になる。ただし、「フルスイング」あるいは「Rail to Rail」と称されるオペアンプの場合は、出力の範囲は電源電圧とほぼ等しい範囲になる。

式(1)の V_o の値がオペアンプの出力可能な範囲を超えると、出力は飽和する。オペアンプの電圧利得は非常に大きいため $V_1 - V_2 > 0$ のとき+側に飽和し、 $V_1 - V_2 < 0$ のとき-側に飽和する。図で表すと図 1(b)のようになる。

オペアンプを含む回路を設計するときは、通常は次に示す理想オペアンプとして設計する。

- 電圧利得 ∞ ($A_v = \infty$)
- 入力インピーダンス ∞

- 出力インピーダンス 0
- 利得帯域幅 ∞

等価回路を描くと図2のようになる。

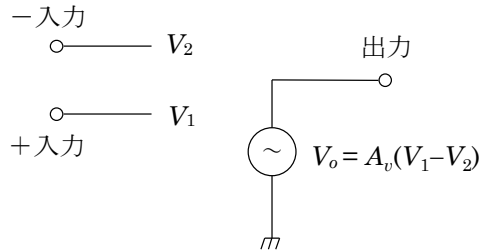


図2 理想オペアンプの等価回路

オペアンプの使い方として、以下の2通りの使い方がある。

1. 負帰還をかけて使用する
2. コンパレータとして使用する

2.3 負帰還をかけて使う方法

オペアンプの「出力」と「-入力」を直流を通す素子で接続すると、負帰還 (Negative Feedback) がかかる。こうすると、「-入力端子の電圧 V_2 」と「+入力端子の電圧 V_1 」が等しくなるように V_o が決定される。オペアンプを増幅器として使用する場合、図3に示すように、2通りの回路構成がある。

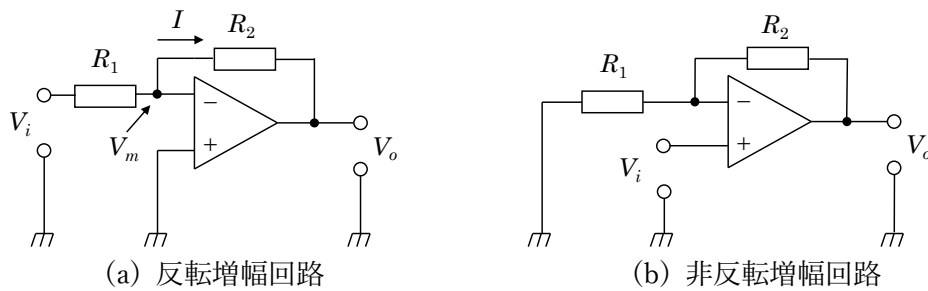


図3 増幅回路の構成

理想オペアンプと考えたとき、入出力関係は次式になる。

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (2)$$

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_i \quad (3)$$

式(2)の導出方法について述べる。図3(a)において、負帰還がかかっているため、「-入力端子」と「+入力端子」の電圧は等しい。すなわち、 $V_m = 0$ である。また入力インピーダンスは無限大なので、-端子に流れ込む（あるいは流れ出す）電流はない。ゆえに、以下の式が成立する。

$$V_i = R_1 I \quad (4)$$

$$V_o = -R_2 I \quad (5)$$

(4)(5)より式(2)が得られる。図3(b)においては、 V_o を R_1 と R_2 で分圧したときに R_1 にかかる電圧は

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o \quad (6)$$

であり、これが V_i と等しい。 $V_o =$ の形に直すと(3)が得られる。

図3(b)の非反転増幅回路において、 $R_1 = \infty$, $R_2 = 0$ に設定すると、図4のボルテージフォロワと呼ばれる回路が得られる（バッファとも呼ばれる）。入出力関係は $V_i = V_o$ である。この回路は入力インピーダンスが非常に高いのに対して（理想オペアンプの場合は無限大）、出力インピーダンスが非常に低い（理想オペアンプの場合はゼロ）のが特徴である。すなわち、オペアンプの出力側に接続した回路の影響が入力側に及ばない。

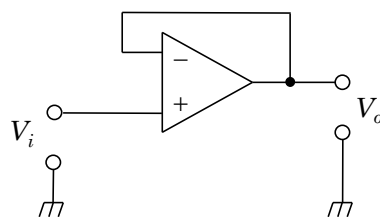


図4 ボルテージフォロワ

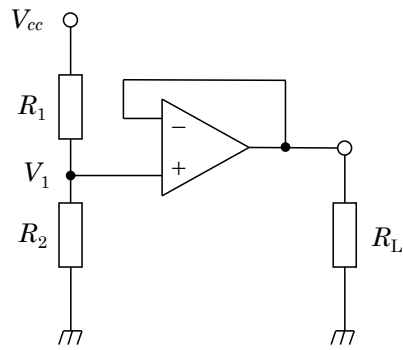


図5 バッファの使用例

例えば図5の場合、抵抗 R_1 と R_2 で分圧した電圧 V_1 が負荷 R_L にかかる。負荷 R_L の値がいかなる値であろうと、電圧 V_1 は不変である。バッファを介さずに V_1 の場所に直接 R_L を接続すると、 V_1 の場所とアースの間の抵抗値は R_2 と R_L の並列接続の合成値となるので、 R_L が変わると分圧電圧 V_1 が変化する。

図3(a)における抵抗 R_1, R_2 は L, C, R の組み合わせで置き換えることができる。図6(a)に示すように、 R_1 を C で置き換えると微分回路が得られ、図6(b)のように R_2 を C で置き換えると積分回路が得られる。

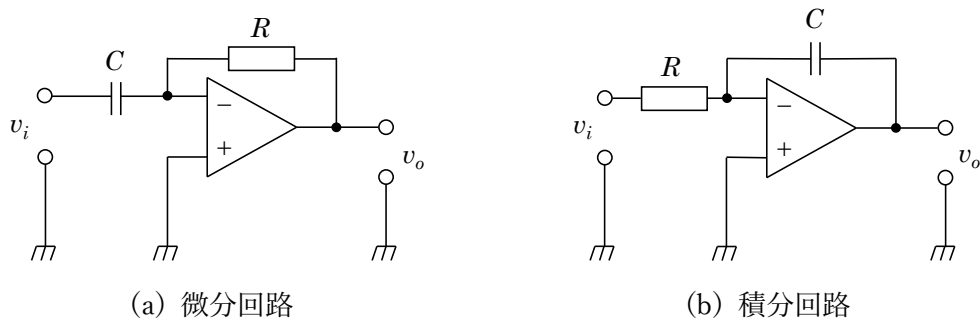


図6 微分回路・積分回路

入出力関係は次式で与えられる。

$$\text{微分回路} : v_o = -RC \frac{dv_i}{dt} \quad (7)$$

$$\text{積分回路} : v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt \quad (8)$$

図6(a)の微分回路の入出力特性を複素記号法を用いて出すと、周波数が高くなると増幅率が無限大になる。それを防止するため、実用に使うときはコンデンサに直列に抵抗を入

れる。

図 6(b)の積分回路は入力電圧に少しでも直流成分が含まれていると C が飽和する。それを防止するために C に並列に高抵抗を入れる。

ダイオードなどの非線形素子を用いると、さらに複雑な入出力特性を実現することが出来る。

負帰還をかけてオペアンプを使う方法としては、図 3, 図 4, 図 6 で示した以外にも定番的なパターンが何種類かある。詳しくは電子回路の教科書などを参照してほしい。

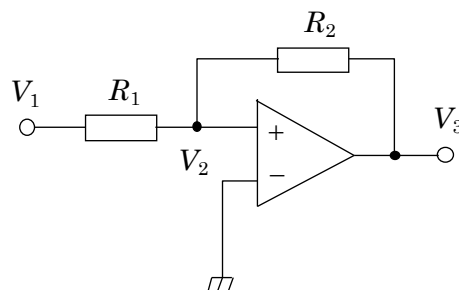
2.4 コンパレータ（比較器）として使う方法

理想的なオペアンプの増幅率 A_v は無限大なので、(1)から分かるように、 $V_1 > V_2$ のときに出力は+側に飽和し、 $V_1 < V_2$ のときに出力は-側に飽和する。オペアンプは「2つの入力端子の電圧を比較し、2 値の出力を得る回路」として用いることが出来る。そのような働きをする素子をコンパレータと呼ぶ。

本実験では発振周波数が比較的低い（数 kHz）のでオペアンプをコンパレータとして用いるが、一般にはコンパレータ専用の IC を用いる（以下、コンパレータ専用 IC をコンパレータと呼ぶ）。理由はオペアンプには位相補償用のコンデンサが入っているため、出力の切り替えのスピードが比較的低速なのに対して、コンパレータは高速だからである。コンパレータの回路記号はオペアンプと同一である。コンパレータに負帰還をかけてオペアンプのように用いると、位相補償用のコンデンサが入っていないため、発振することがある。

コンパレータの出力形式には「オープンコレクタ（あるいはオープンドレイン）」と「ブッシュプル」の 2 つの形式がある。オープンコレクタの場合、出力端子と電源端子を抵抗で接続しないと、出力電圧が得られない。

2.5 ヒステリシス付きコンパレータ



1 図 7 ヒステリシス付きコンパレータ

図 7 にヒステリシス付きコンパレータの回路図を示す。ヒステリシスとは履歴を持つことを意味する。入力に対して出力が一意に決まるのではなく、「現在の入力」と「現在の

状態」によって出力がきまる。現在の状態は過去の入力と初期状態によって決まるので、ヒステリシス付きコンパレータ（履歴を持った比較器）と呼ばれる。

オペアンプの出力 V_3 は $V_2 > 0$ のとき+側に飽和し、 $V_2 < 0$ のとき-側に飽和する。図7の回路において、オペアンプは二者択一の状態を持つ。

V_2 の値は入力 V_1 と出力 V_3 を R_1 と R_2 で分圧した値であり、次式で得られる。

$$V_2 = \frac{R_2 V_1 + R_1 V_3}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

V_3 が飽和したときの電圧をそれぞれ $+E$ 、 $-E$ とすると、 $V_2 = 0$ となるときの V_1 の値はそれぞれ以下のようなになる。 $V_3 = E$ のとき

$$V_1 = -\frac{R_1}{R_2} E \quad (10)$$

$V_3 = -E$ のとき

$$V_1 = \frac{R_1}{R_2} E \quad (11)$$

V_1 が上記の値を横切るときに出力が反転する。その結果、図8のような特性を持つ。出力が+側に飽和しているときの特性を赤線で表し、-側に飽和しているときの特性を黒線で表す。 V_1 が

$$-\frac{R_1}{R_2} E < V_1 < \frac{R_1}{R_2} E \quad (12)$$

の範囲のとき、出力は2通りの値を取りうる。

$$V_1 < -\frac{R_1}{R_2} E \quad (13)$$

のときオペアンプは必ず-側に飽和し、

$$\frac{R_1}{R_2} E < V_1 \quad (14)$$

のとき必ず+側に飽和する。

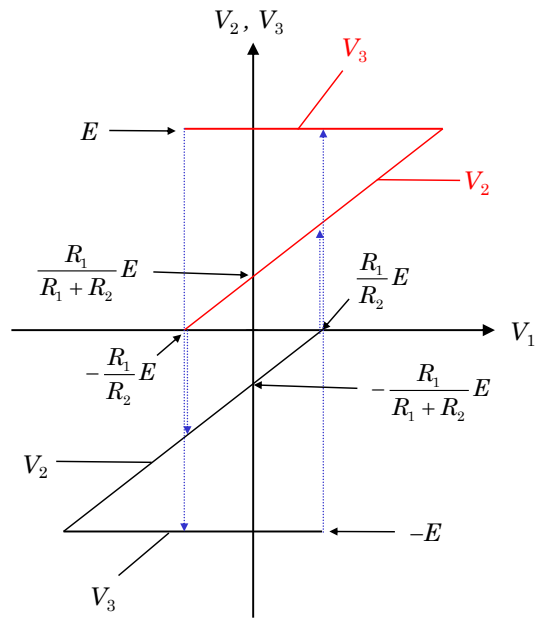


図8 ヒステリシス付きコンパレータの特性

2.6 三角波発生回路

図 6(b)で示した積分回路と図 7 で示したヒステリシス付きコンパレータをループ状に接続して図9のような回路を構成する。コンパレータは v_1 の絶対値が $\frac{R_1}{R_2}E_1$ を超えると反転するので、この回路が発振するには $R_1 < R_2$ が必要である。

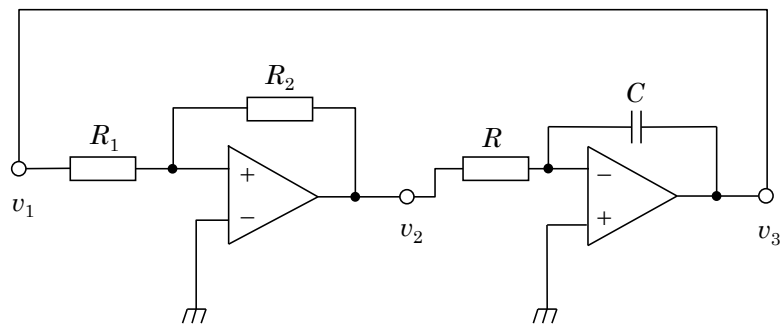


図9 三角波発生回路

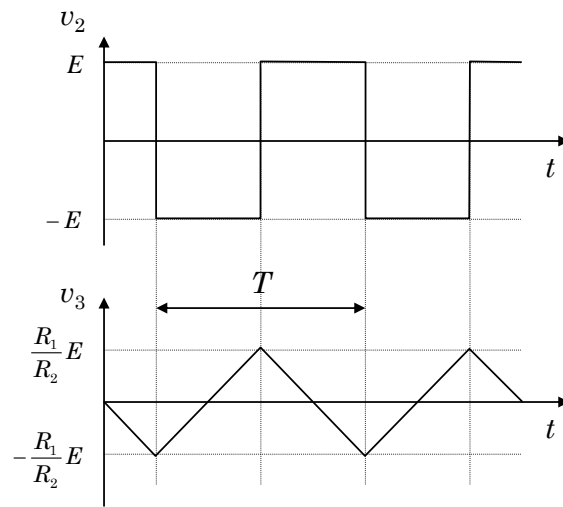


図 10 v_2 と v_3 の波形

v_2 と v_3 の波形を図 10 に示す。 v_3 から三角波、 v_2 から方形波が観測される。積分回路において入力電圧が一定値 E のとき、(8)より、出力電圧は

$$v_o = -\frac{E}{RC}t \quad (15)$$

となり、傾きは $\pm \frac{E}{RC}$ である。出力電圧の絶対値が $\frac{R_1}{R_2}E$ を超えたとき左側のオペアンプの出

力が反転する。周期 $\frac{T}{2}$ と傾き $\frac{E}{RC}$ を掛けると出力電圧の変化幅 $2\frac{R_1}{R_2}E$ に等しくなるので、

$$\frac{1}{2}T = \frac{2\frac{R_1}{R_2}E}{\frac{E}{RC}} = \frac{2R_1RC}{R_2} \quad (16)$$

が得られる。周波数 f は周期の逆数なので、

$$f = \frac{R_2}{4R_1RC} \quad (16)$$

が得られる。

本実験で使用するオペアンプは TL072 (あるいは LM358) という型番である。オペアンプは TI (Texas Instruments), NS (National Semiconductor) (NS は 2011 年に TI に買収された) 新日本無線, NEC, アナログデバイセズ, LT (Linear Technology) などの会社から無数の品種が販売されている。とはいえ、定番的なオペアンプは 100 種類以下である。

TL072 は古くから使われ続けている安価な定番品の一つである。JFET 入力なので、入力インピーダンスが非常に高いのが特徴である。

2.7 オペアンプの型番とピン配置

大抵の場合、ある会社が発売しているオペアンプの互換品を別の会社が発売している。オペアンプの型番は 3~4 桁の数字で表される。例えば、NS が LM353 という型番で出しているオペアンプの互換品を新日本無線が NJM353 という型番で発売している。この場合、353 という番号が型番である。LM358 の互換品は NEC が μ PC358 という型番で出している。TL072 は TI, Diodes などの複数の会社から発売されており、新日本無線が互換品 NJM072 を出している。

本実験で使用する 072 のピン配置（ピン配列・端子配列と呼ぶこともある）を図 11 に示す。丸印が付いているピンが 1 番ピンである。このピン配置は 8 端子の中に 2 個のオペアンプが入っているモデルにほぼ共通である。

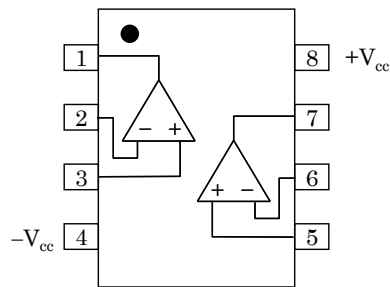
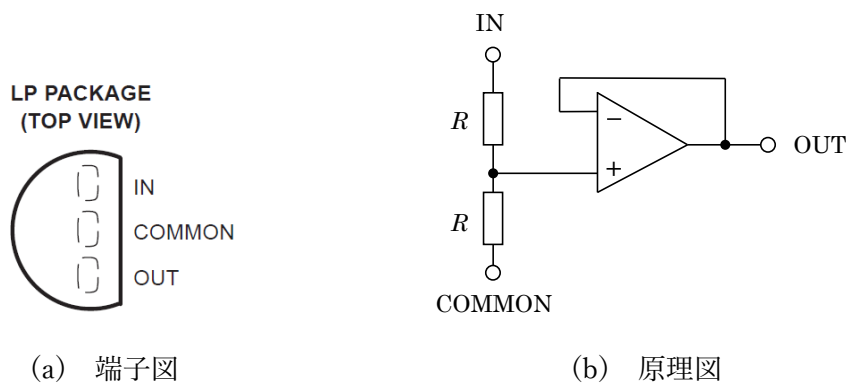


図 11 072 のピン配置

3. 実験課題

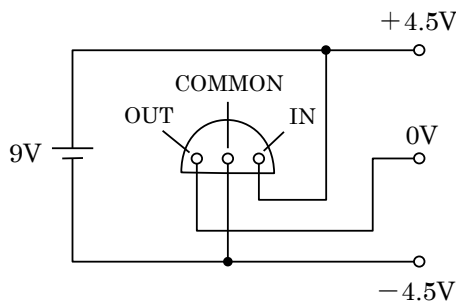
3.1 分圧用 IC の使い方

本実験では 9V の電池と分圧用 IC TLE2426 を使って +4.5V, 0V, -4.5V の 3 つの電圧を作り出す。TLE2426 の端子図を図 12(a)、動作原理を同図(b)、電池との結線を同図(c) に示す。



(a) 端子図

(b) 原理図



(c) 結線図

図 12 分圧用 IC TLE2426

3.2 ブレッドボード上における製作

以下の電子部品を用いて三角波発生回路をブレッドボード上に作成しなさい。

- 充電式電池 9V
- 分圧用 IC TLE2426
- コンデンサ $0.1\mu\text{F}$
- 抵抗 $5\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega \times 2$
- オペアンプ 072

出力電圧の波形をオシロスコープで観測し、発振周波数を記録しなさい。

次に式(16)から得られる値と比較しなさい。可変抵抗を含めて、各抵抗の値とコンデンサの値はデジタルマルチメータで正確な値を測定しなさい。

3.3 ユニバーサル基板における製作

3.2 節で作成した回路をユニバーサル基板上に組みなさい。ただし、発振周波数を変えられるように、積分回路の R は $20\text{k}\Omega$ の可変抵抗にしなさい。可変抵抗を固定するためにボール盤で大きい穴と小さい穴の 2 つの穴をあけなさい。