最終更新　2019.6.28

三角波発生回路の製作

奈良教育大学　薮 哲郎

# 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。

# 理論解説

##  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。

　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個使って三角波発生回路を作成する。

##  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個あるのでオペアンプは最低5個の端子を持つ。電源端子は省略されることが多い。



　　　　　　　　(a) 入出力端子　　　　　　 　　　　(b) 入出力特性

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て回路を構成する。

　オペアンプを両電源で駆動する場合、入出力関係は次式で与えられる。

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{o} =A\_{v}\left(V\_{1}-V\_{2}\right)$$ | (1) |

ここで、*Vo*は出力電圧、*V*1は非反転入力電圧、*V*2は反転入力電圧、*Av*はオペアンプの増幅率である。オペアンプの増幅率*Av*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*Vo*, *V*1, *V*2は±両方の値をとりうる。

　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、9 Vの充電式電池を用い、TLE2426 という分圧用ICを用いて、＋4.5 V, 0 V, －4.5 V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*Vo*の値がオペアンプの出力可能な範囲を超えるとき、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。

1. 電圧利得　∞　(*Av* = ∞)
2. 入力インピーダンス ∞
3. 出力インピーダンス 0
4. 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

##  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*Vo*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2通りの回路構成がある。



　　　　　　　(a) 反転増幅回路　　　　　　　　　　　(b) 非反転増幅回路

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。

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{o}=-\frac{R\_{2}}{R\_{1}}V\_{i}$$ | (2) |
| $$V\_{o}=\frac{R\_{1}+R\_{2}}{R\_{1}} V\_{i}$$ | (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ので、「－入力端子」と「＋入力端子」の電圧は等しい。すなわち、*Vm* = 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。

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{i}=R\_{1}I$$ | (4) |
| $$V\_{o}=-R\_{2}I$$ | (5) |

　(4)(5)より式(2)が得られる。図3(b)においては、*Vo*を*R*1と*R*2で分圧したときに*R*1にかかる電圧は

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{R\_{1}}{R\_{1}+R\_{2}}V\_{o}$$ | (6) |

であり、これが*Vi*と等しい。*Vo* = の形に直すと(3)が得られる。

　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4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4　積分回路

　入出力関係は次式で与えられる。

|  |  |
| --- | --- |
| $$v\_{o}=-\frac{1}{RC}∫v\_{i} dt$$ | (7) |

　図4の積分回路は出力端子と－入力端子がコンデンサで接続されており、直流を通さない。直流に対して負帰還がかかっていない。回路シミュレータでは動作するが、実際に回路を組むと、出力が飽和してしまい、使えない。入力電圧にわずかでも直流成分が含まれているとそれが積算され、出力が飽和する。入力電圧に直流成分が含まれなくても、オペアンプのオフセット電圧のため、出力は飽和する。

　出力が飽和するのを防止するには、*C* に並列に高抵抗を入れる。本実験で作成する三角波発生回路は図4の積分回路を含むが、出力と入力を結ぶ経路が別に存在するため、出力が飽和することはない。

　負帰還をかけてオペアンプを使う方法としては、ここで挙げ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を参照してほしい。

##  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*Av*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できる。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、出力が変化する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「プッシュプル」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。

##  ヒステリシス付きコンパレータ



図5　ヒステリシス付きコンパレータ

　図5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5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。

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{2}=\frac{R\_{2}V\_{1}+R\_{1}V\_{3}}{R\_{1}+R\_{2}}$$ | (8) |

　*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になる。*V*3 = *E*のとき

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{1}=-\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E$$ | (9) |

*V*3 =*E*のとき

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{1}=\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E$$ | (10) |

　*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6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

|  |  |
| --- | --- |
| $$-\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E<V\_{1}<\frac{R\_{1}}{R\_{2}}$$ | (11) |

の範囲のとき、出力は2通りの値を取りうる。

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{1}<-\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E$$ | (12) |

のときオペアンプは必ず－側に飽和し、

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E<V\_{1}$$ | (13) |

のとき必ず＋側に飽和する。



図6　ヒステリシス付きコンパレータの特性

##  三角波発生回路

　図4(b)で示した積分回路と図5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7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7　三角波発生回路



図8　*v*2と*v*3の波形

　*v*2と*v*3の波形を図8に示す。*v*3から三角波、*v*2から方形波が出力される。積分回路において入力電圧が一定値*E*のとき、(7)より、出力電圧は

|  |  |
| --- | --- |
| $$v\_{o}=-\frac{E}{RC}t$$ | (14) |

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、

|  |  |
| --- | --- |
| $$\frac{1}{2}T=\frac{2\frac{R\_{1}}{R\_{2}}E}{\frac{E}{RC}}=\frac{2R\_{1}RC}{R\_{2}}$$ | (15) |

が得られる。周波数*f*は周期の逆数なので、

|  |  |
| --- | --- |
| $$f=\frac{R\_{2}}{4R\_{1}RC}$$ | (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。ただし、定番品がいくつかあり、ポピュラーなオペアンプの個数は100種類以下であると思われる。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。

##  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μPC358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9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9　072のピン配置

# 実験課題

##  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＋4.5 V, 0 V, －4.5 Vの3つの電圧を作り出す。TLE2426の端子図を図10(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10　分圧用IC　TLE2426

##  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。

1. 充電式電池　9 V
2. 分圧用IC　TLE2426
3. コンデンサ　0.1μF
4. 抵抗　5 kΩ, 10 kΩ×2
5. 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。

##  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 kΩ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。