

第8章 電子回路



アナログ回路

増幅回路 (Amplifying Circuit)、増幅器 (Amplifier)

小さな信号を大きな信号に拡大する回路。時には高入力 $Imp.$ を低出力 $Imp.$ へとインピーダンス変換したり、不用の信号・雑音を取り除く。電子回路の中で最も基本となる回路)

電圧・電流・電力増幅器、直流・交流増幅器、選択増幅器、差動増幅器、広帯域・狭帯域増幅器、A級・B級・C級増幅器、プッシュプル増幅器、他

発振回路 (Oscillation Circuit)、発振器 (Oscillator)

増幅器等の大半の回路は入力があって出力を出す、入力が無くても電源を入れるだけで一定の波形を連続的に発振させる回路をさす。

LC(コルピッツ、ハートレー)発振器、RC(移相形、ターマン、ウィーンブリッジ形)発振器、水晶発振器、マイクロ波発振器、他

変調回路 (Modulation Circuit)、変調器 (Modulator)

電話のように音声を一定振幅・周期の別の信号に重畳してから送り出す回路で、ラジオやFM放送、さらにはテレビもこの回路を通して信号を出す。

振幅変調器 (AM)、周波数変調器 (FM)、位相変調 (PM)、パルスコード変調器 (PCM)、磁気変調器 (Magnetic Modulator)、他

アナログ回路

復調回路 (Demodulation Circuit)、**復調器**(Demodulator)

変調された波から信号波を取り出すことを復調、または検波というが、検波には別の意味もある。変調に対して復調する装置を復調器という。

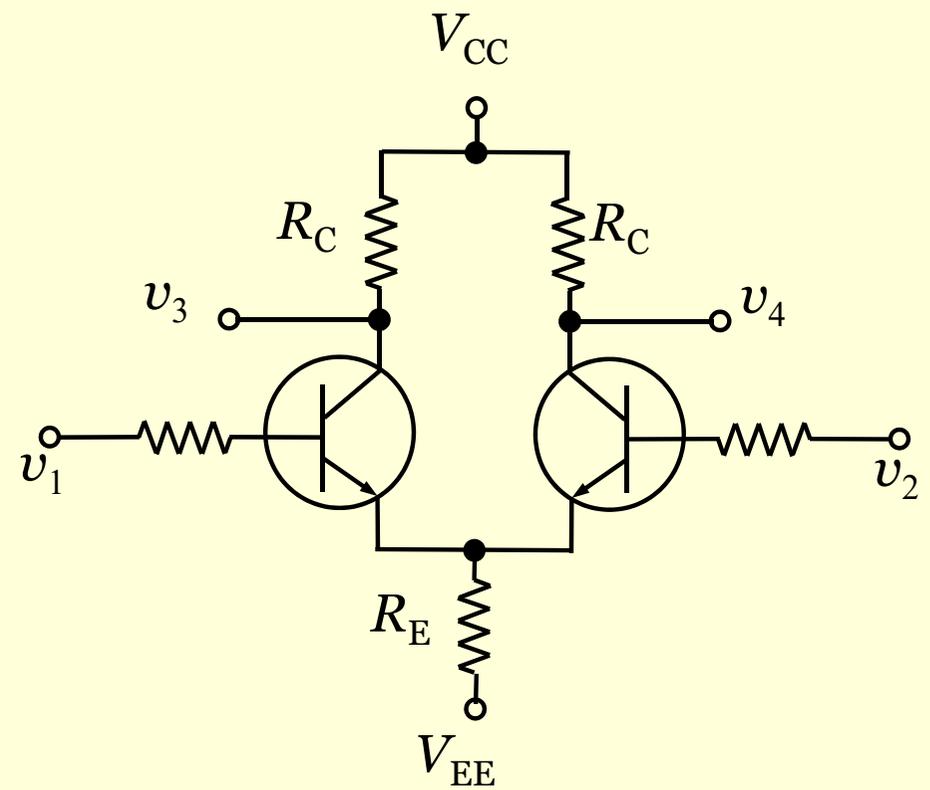
AM検波器、(スーパー)ヘテロダイン検波器、周波数弁別器(FM検波器)、パルスコード復調器、他

電源回路 (Electric Power Circuit)、**電源**(Power Source、 Power Supply)

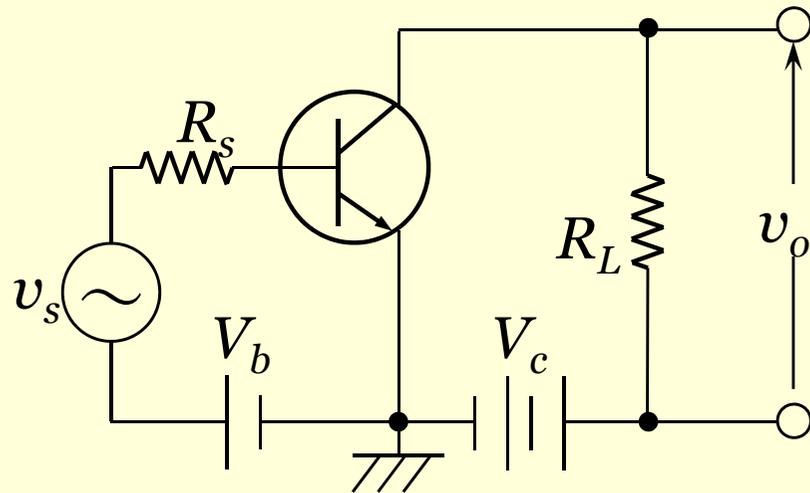
回路を駆動するための電力を供給する回路を電源回路という。100V商用交流電源から必要な直流電圧を得るため、一般的には変圧回路・整流回路・平滑回路からなる構成をとる。

電圧電源、電流電源、他 [別:蓄電池(Battery)、電池(Cell)、他]

增幅器

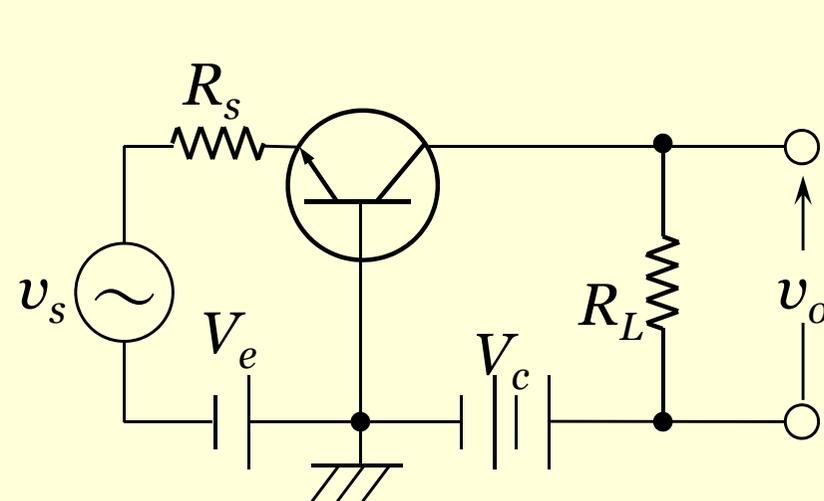


トランジスタ(単純)増幅回路



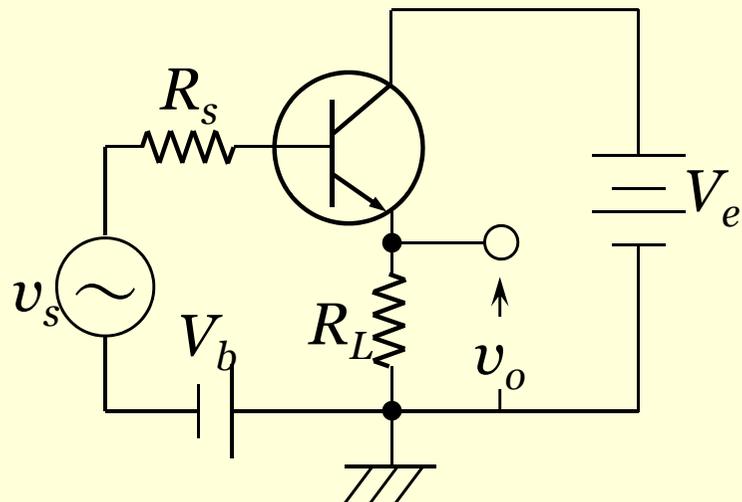
エミッタ接地増幅回路

電圧利得と電流利得が大きいので、電力利得が大きな増幅器で利用



ベース接地増幅回路

電圧利得は大きく、電流利得は1より小さいが、高い周波数まで安定。



コレクタ接地増幅回路

電流利得は大きいですが電圧利得が1より小さい。入力 I_{mp} は非常に大きい。

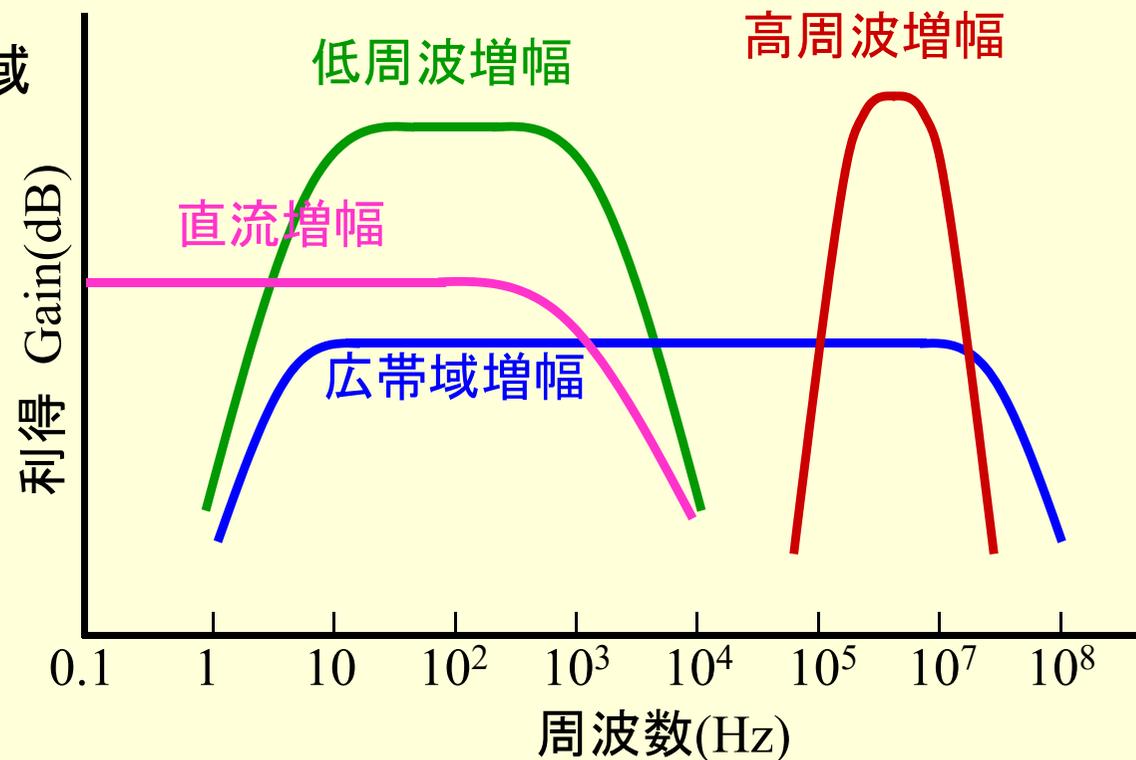
増幅器と動作帯域

目的別分類: 電圧増幅器、電流増幅器、電力増幅器

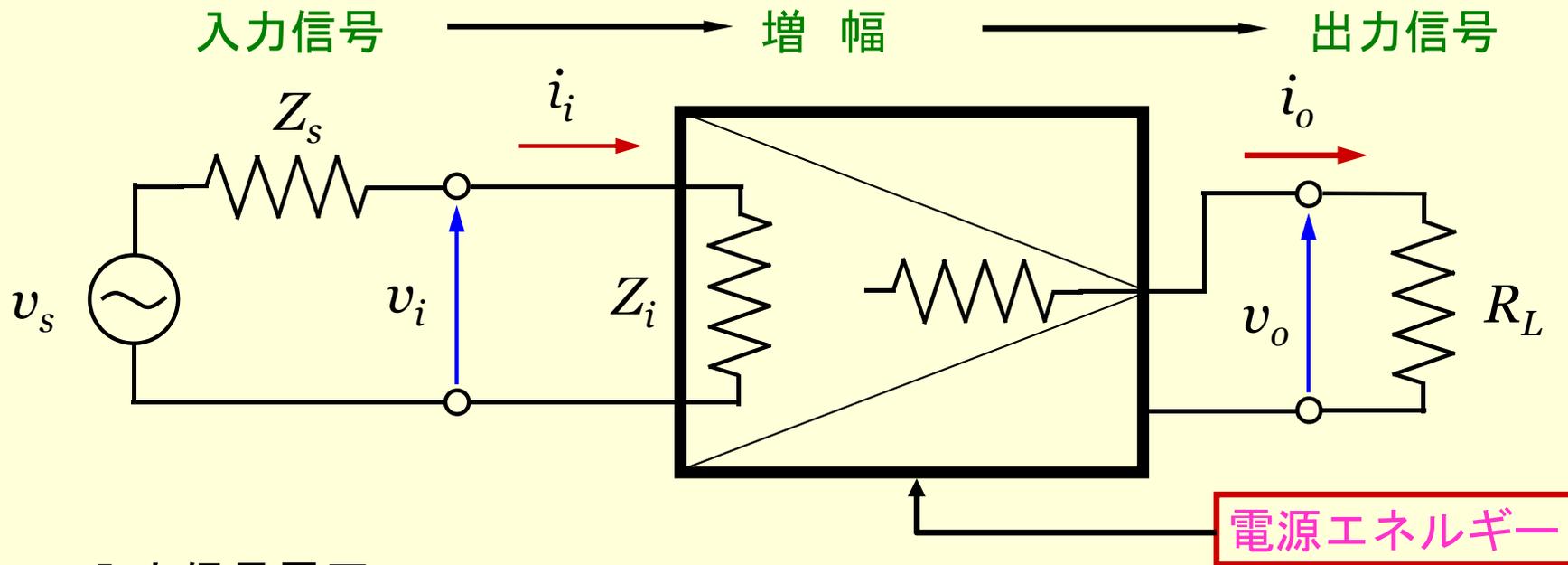
信号周波数別分類: 直流増幅器、低周波増幅器、高周波増幅器、広帯域増幅器、狭帯域増幅器[選択増幅器]

構成別分類: 差動増幅器、プッシュプル増幅器(A級、B級、C級)、他

増幅器の動作帯域



増幅器の入出力関係



入力信号電圧: v_s

信号源インピーダンス: Z_s

増幅器の入カインピーダンス: Z_i

負荷インピーダンス(抵抗): R_L

増幅器への入力電圧: v_i

入力電流: i_i

出力電圧: v_o

出力電流: i_o

$$v_i = \frac{Z_i}{Z_s + Z_i} v_s$$

$$i_s = v_s / Z_s$$

$$i_i = \frac{Z_s}{Z_s + Z_i} i_s \cong i_s$$

増幅器の利得

入力に対する出力の比を増幅度または利得といい、一般に A で表す。入力信号の電圧、電流、電力を v_i 、 i_i 、 P_i とし、出力信号のそれらを v_o 、 i_o 、 P_o とすると、それぞれの利得は以下となる。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i$$

利得は倍率を表し、増幅器の種類によって数倍から 10^6 ~のものまであり、範囲が非常に広い。そこで常用対数を用いて利得を表し、単位にデシベル(dB)が用いられている。

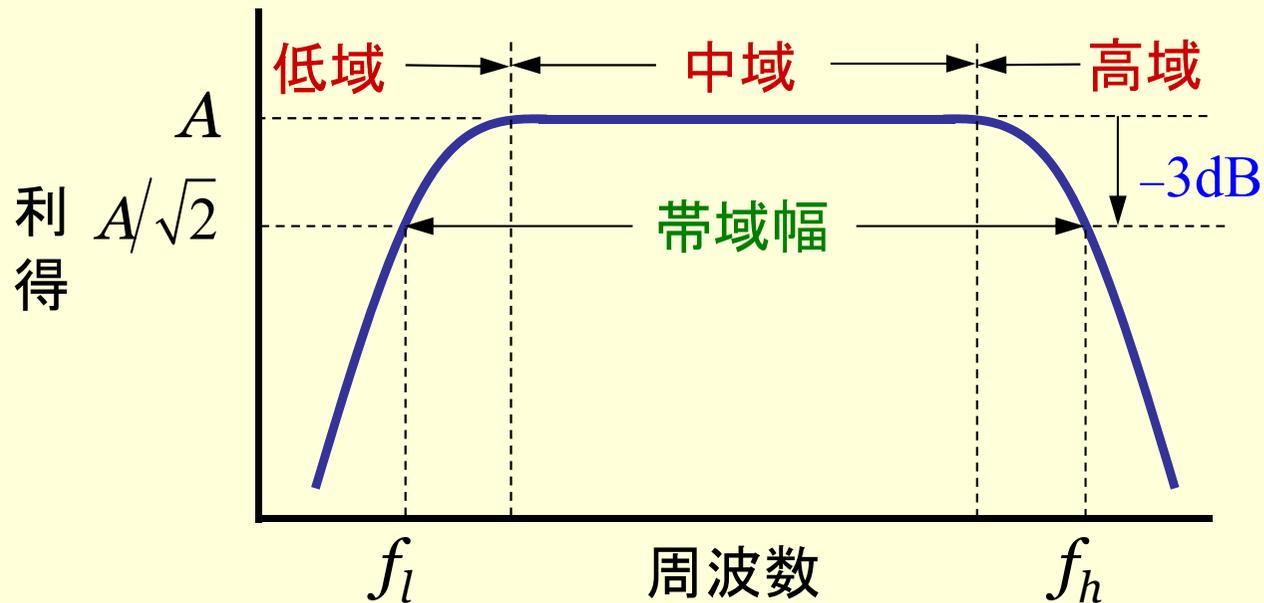
$$G_v = 20 \log_{10} \frac{v_o}{v_i} \quad [\text{dB}]$$

$$G_i = 20 \log_{10} \frac{i_o}{i_i} \quad [\text{dB}]$$

$$G_p = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad [\text{dB}]$$

$$\begin{aligned} G_p &= 10 \log_{10} \frac{v_o^2 / Z_L}{v_i^2 / Z_i} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{v_o}{v_i} \right)^2 \\ &= 20 \log_{10} \frac{v_o}{v_i} \quad [\text{dB}] \end{aligned}$$

周波数特性



増幅器に一定信号の正弦波を入力し、その周波数を変えると図のような利得曲線が得られる。この曲線を増幅器の**周波数特性**という。中域の平坦な利得を基準にして3dBダウン($1/\sqrt{2}$ 倍、70.7%)する周波数を遮断周波数という。 f_l を**低域遮断周波数**、 f_h を**高域遮断周波数**といい、この間を増幅器の**帯域**という。

利得と帯域幅の積をGB積(増幅器の良さを示す指標)という。

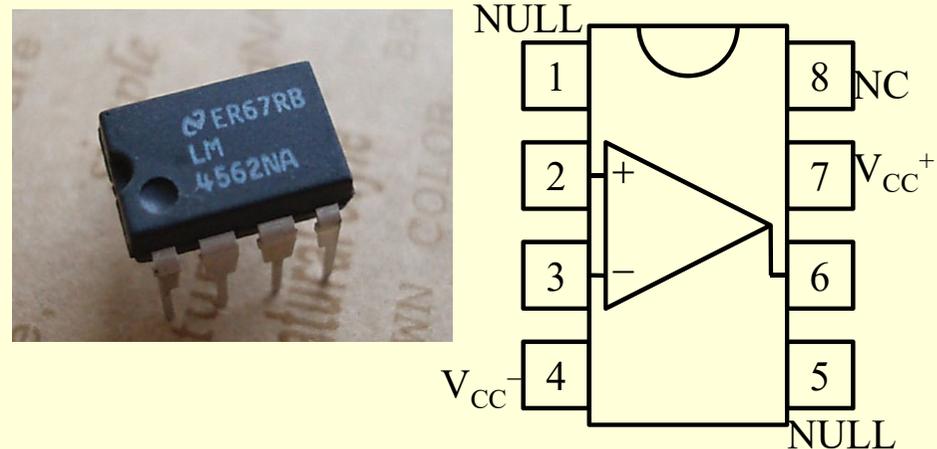
オペアンプ

アナログ信号処理デバイスとして、演算増幅器 (operational amplifier、**オペアンプ**) が多く用いられる。

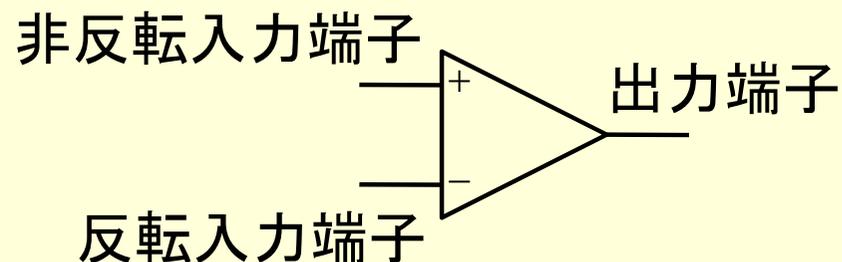
オペアンプの特徴は、

- 1) 入力インピーダンスが高い
(数百 $k\Omega$ ~数 $M\Omega$)
- 2) 出力インピーダンスが低い
(数十 Ω)
- 3) 電力増幅度が大きい ($10^4 \sim 10^6$)
- 4) 周波数帯域が広い
- 5) 内部雑音が少ない

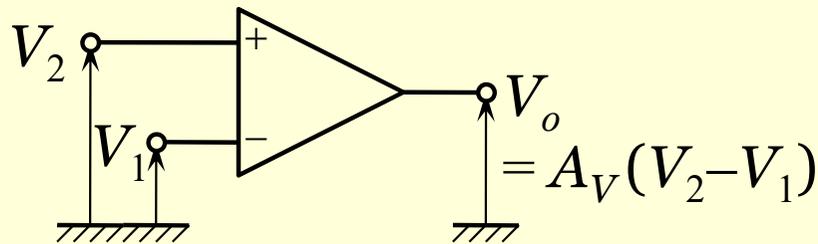
オペアンプの入出力特性は、これにつながれた周辺回路によって決まる。



最も一般的に用いられるDILパッケージのオペアンプ



信号の増幅



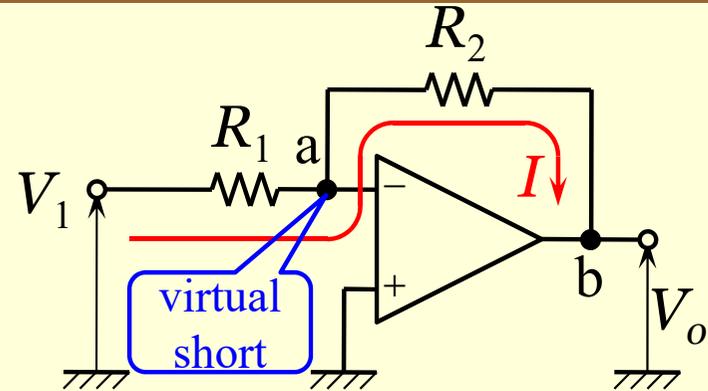
オペアンプの2つの入力端子に電位差($V_2 - V_1$)が生ずると、出力端子に増幅された電圧 V_o が発生する。オペアンプの増幅度を A_V とすると、

$$V_o = A_V(V_2 - V_1)$$

となる。ただし、この方法では出力電圧は電源電圧 V_{CC} を超えることはできない。

反転増幅回路

オペアンプの出力を反転入力端子へ戻し(負帰還)、非反転入力端子をアースに接続する。入力端子に電圧 V_1 を加えると、**入力端子aの電圧が0となるように電流が流れる**。オペアンプの入力端子間の電位差が0と



なるので、これを**仮想短絡**という。a点には電流 $I = V_1 / R_1$ が流れ、オペアンプの入カインピーダンスが大きいので、b点にもこの電流が流れる。b点の電位はa点よりも低くなり、出力電圧 V_o は、

$$V_o = -R_2 I = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

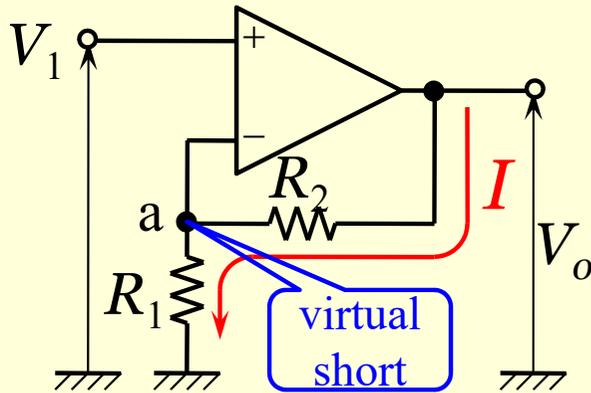
となる。増幅度は、

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1}$$

となり、抵抗の比のみで与えられる。また、極性は**入力電圧と逆**になる。

信号の増幅

非反転増幅回路



入力電圧を非反転入力端子に加え、反転入力端子に帰還をかけると、入力電圧と同じ極性で増幅することができる。入力インピーダンスが高いため、a点には電流 $I = V_o / (R_1 + R_2)$ が流れ、またa点の電位は V_1 と等しくなることから、

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

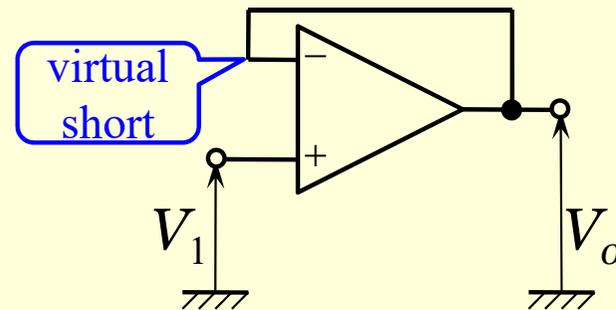
$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_1$$

よって、増幅度は、

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

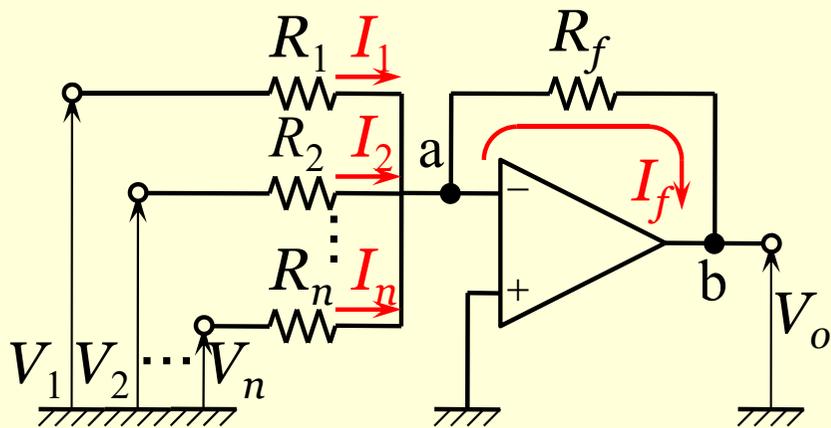
となる。

ボルテージフォロウ



ボルテージフォロウは仮想短絡のため、帰還回路に電流が流れず、増幅度が1の特殊な回路である。負荷による電圧降下を防ぐための緩衝器(バッファ)として用いる。

信号の演算(加算)



複数の入力電圧の加算値に比例した出力を得るためには、**加算増幅回路**を用いる。

n 個の入力電圧 V_1, V_2, \dots, V_n をそれぞれ R_1, R_2, \dots, R_n を通して反転増幅回路に入力する。帰還抵抗 R_f を流れる電流 I_f は、

$$I_f = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

となる、ただし、

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, I_2 = \frac{V_2}{R_2}, \dots, I_n = \frac{V_n}{R_n}$$

である。その結果、出力電圧 V_o は、

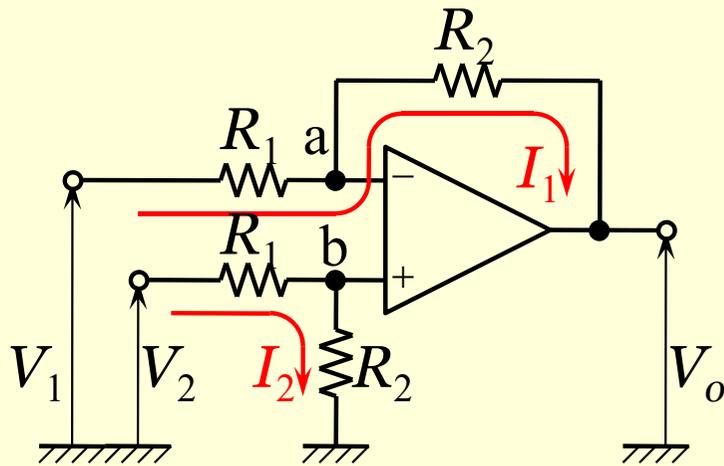
$$V_o = -R_f I_f = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{R_i}$$

となる。ここで、 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ に設定すると、

$$V_o = -\frac{R_f}{R} \sum_{i=1}^n V_i$$

となり、 V_o は入力電圧に比例する値になる。

信号の演算(減算)



2つの入力電圧の差に比例した出力を得るためには、**減算増幅回路**を用いる。この回路は**差動増幅回路**とも言われる。

2つの入力端子a、bの電圧 V_a 、 V_b は、

$$V_a = V_1 - R_1 I_1$$

$$V_b = R_2 I_2$$

であるが、負帰還のため、これらは等しくなる。

$$V_1 - R_1 I_1 = R_2 I_2$$

電流 I_1 と I_2 はそれぞれ、

$$I_1 = \frac{V_1 - V_o}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_1 + R_2}$$

なので、これらを代入すると、

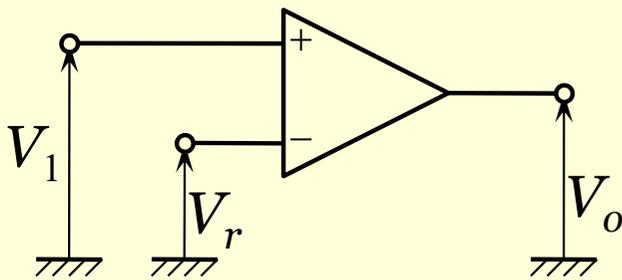
$$V_1 - R_1 \frac{V_1 - V_o}{R_1 + R_2} = R_2 \frac{V_2}{R_1 + R_2}$$

よって、

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

となり、出力電圧は2つの入力電圧の差に比例した値となる。

信号の演算(比較)

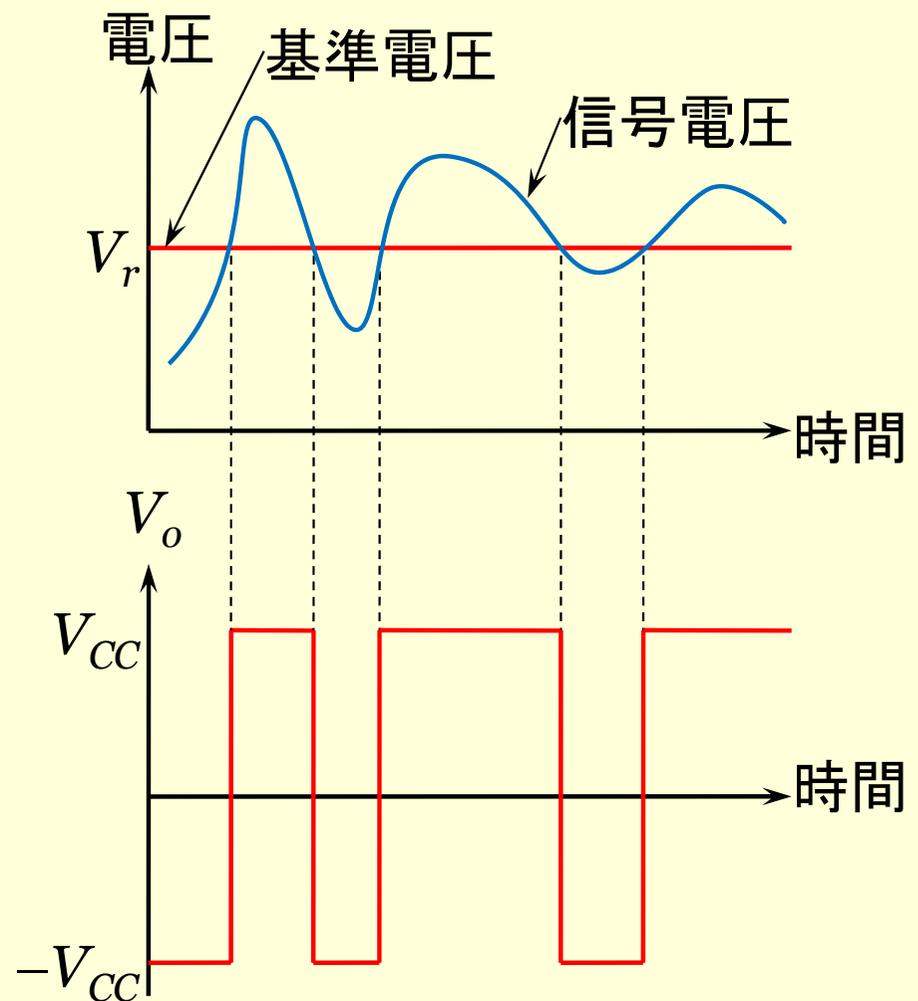


2つの電圧の大きさを比較するには**比較回路**(comparator)を用いる。比較回路は負帰還をかけない回路を用いるため、入力端子間のわずかな電位差で出力電圧が飽和する。そこで、反転入力端子に基準電圧 V_r 、非反転入力端子に信号電圧 V を与えると、

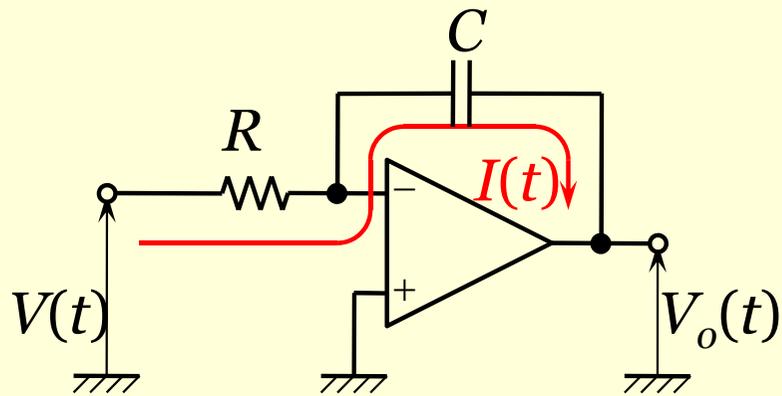
$$V > V_r \text{ のとき、 } V_o = V_{CC}$$

$$V < V_r \text{ のとき、 } V_o = -V_{CC}$$

が出力される。



信号の演算(積分)



信号電圧 $V(t)$ の積分値に比例する出力を得る回路を**積分回路**といい、位相差を作り出すためにコンデンサを用いる。コンデンサの両端の電位差は充電電流の積分値に比例するので、出力電圧 $V_o(t)$ は、

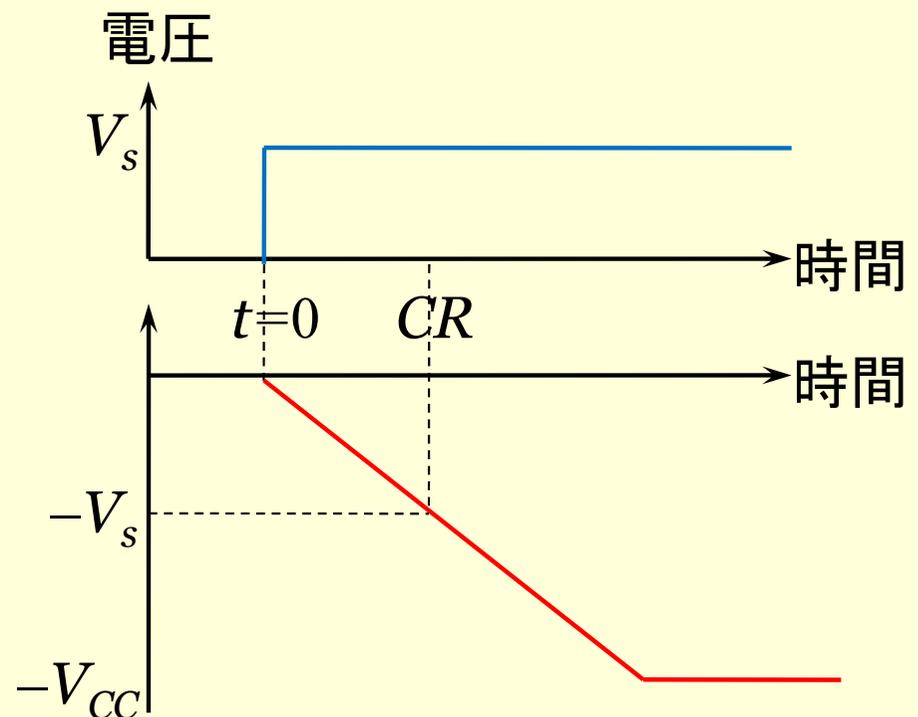
$$V_o(t) = -\frac{1}{C} \int I(t) dt = -\frac{1}{RC} \int V(t) dt$$

となる。これより、出力電圧が信号電圧の積分電圧に比例することがわかる。

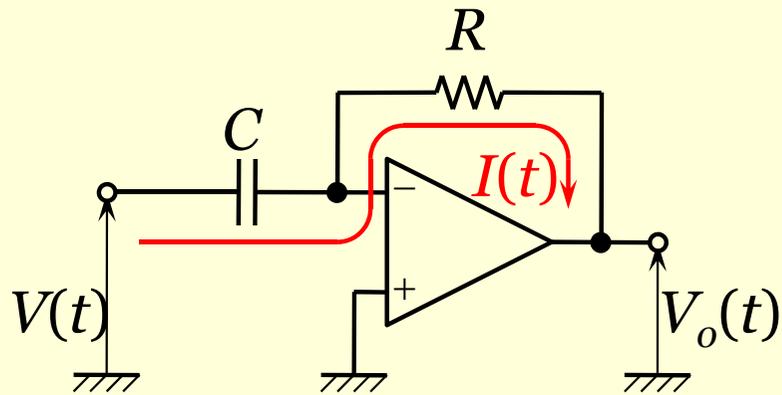
積分回路にステップ上の信号電圧 V_s を加えると、出力電圧は、

$$V_o(t) = -\frac{V_s}{RC} t$$

となり、時間 t に対して直線的に減少し、オペアンプの供給電圧 ($-V_{CC}$) に達すると飽和する。



信号の演算(微分)



信号電圧 $V(t)$ の微分値に比例する出力を得る回路を**微分回路**といい、積分回路の抵抗とコンデンサを入れ替えた回路となる。コンデンサを流れる電流 $I(t)$ は、蓄積される電荷量の微分値に等しいので、

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt}$$

となる。したがって、出力電圧は、

$$V_o(t) = -RI(t) = -RC \frac{dV(t)}{dt}$$

となる。

フィルタ回路

積分回路に入力する信号電圧が $V(t) = V \sin 2\pi ft$ のとき、出力電圧 V_o は、

$$V_o = \frac{V}{2\pi fRC} \cos(2\pi ft)$$

となり、周波数が大きいほど振幅が小さくなる。一方、微分回路は、

$$V_o = -2\pi fRCV \cos(2\pi ft)$$

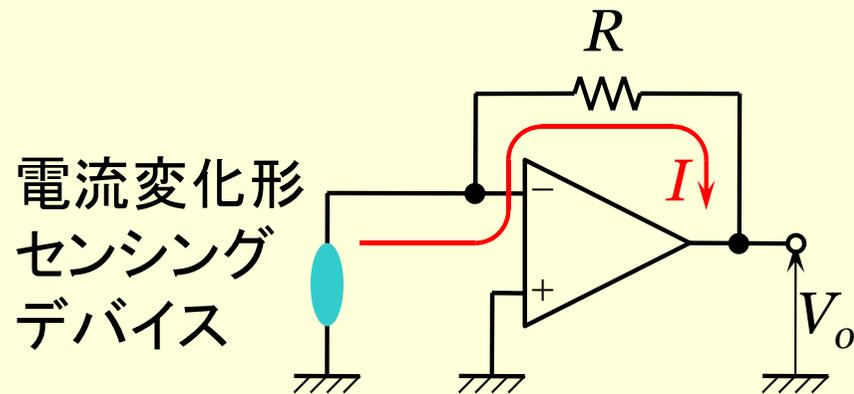
となり、周波数が小さいほど振幅が小さくなることがわかる。

周波数の限界は両者とも共に、

$$f_c = 1/(2\pi RC)$$

で、積分回路は低周波を通すので**低周波フィルタ (low pass filter)**、微分回路は高周波を通すので**高周波フィルタ (high pass filter)**、組み合わせたものを**バンドパスフィルタ**という。

電流－電圧変換

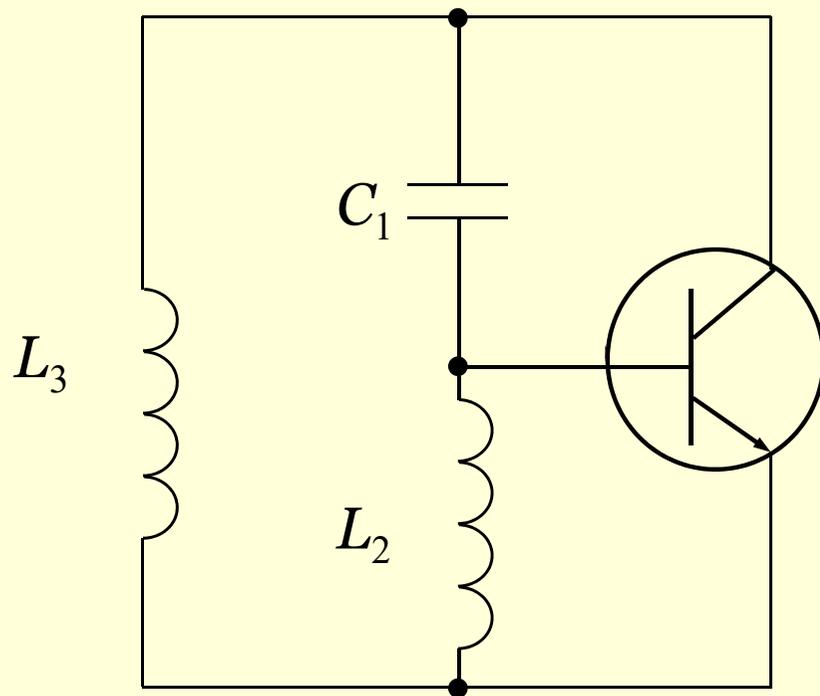


電流変化形センシングデバイスなどを用いるときは、電圧に変換した後、信号処理を行った方が便利である。このような場合は、オペアンプを用いた電流－電圧変換器などを用いて電流量に比例した電圧出力を得る。

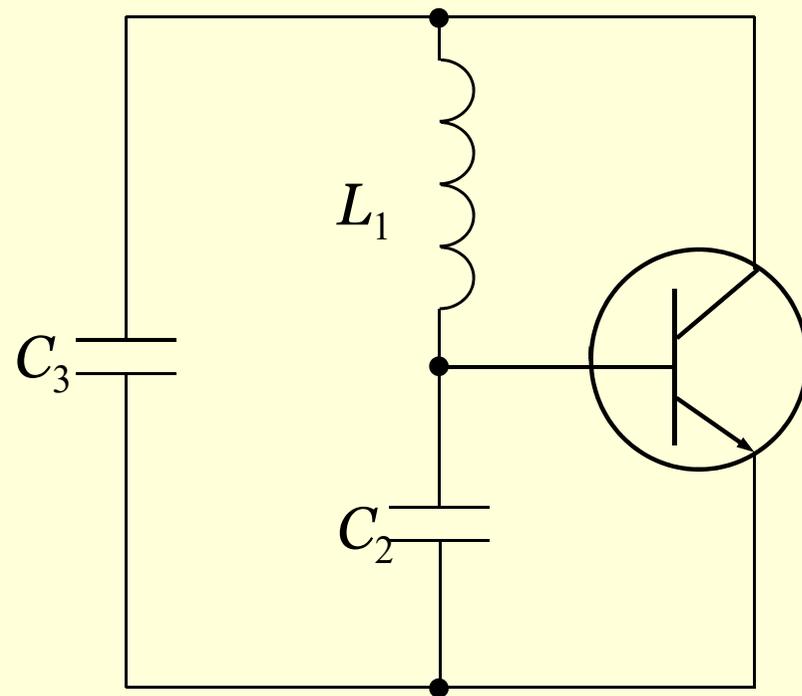
発振器・変調
器・電源

発信回路

一定の周波数を持った周期波形信号を発生する回路を発振回路といい、正弦波を発生する調和発振回路と、ある時定数の過渡現象を繰り返して周期波形を発生する弛張発振回路がある。原理的には増幅回路に帰還回路を介して正帰還をかける帰還形発振回路と、負性抵抗特性を利用する負性抵抗形発振回路がある。

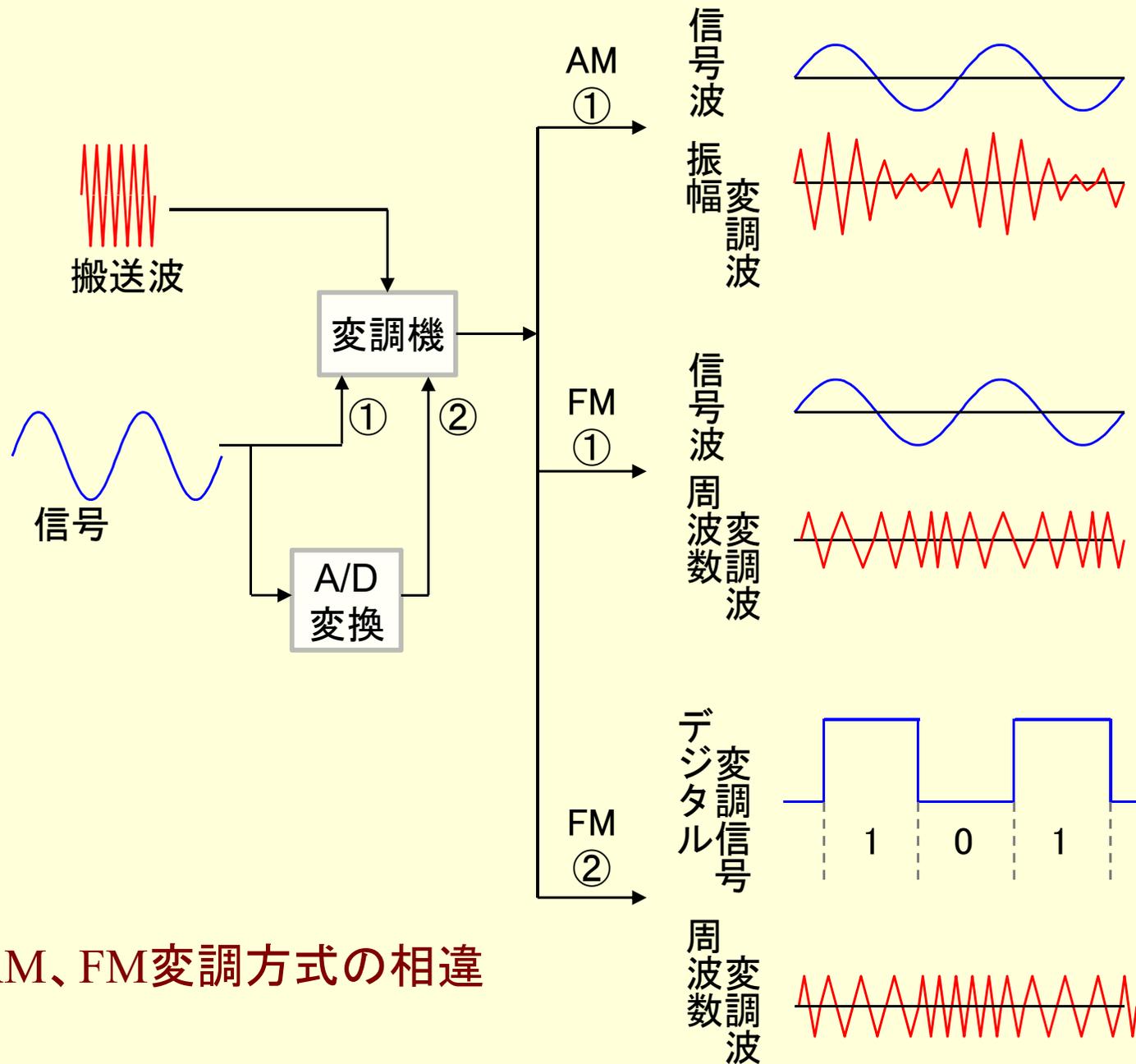


ハートレー形



コルピッツ形

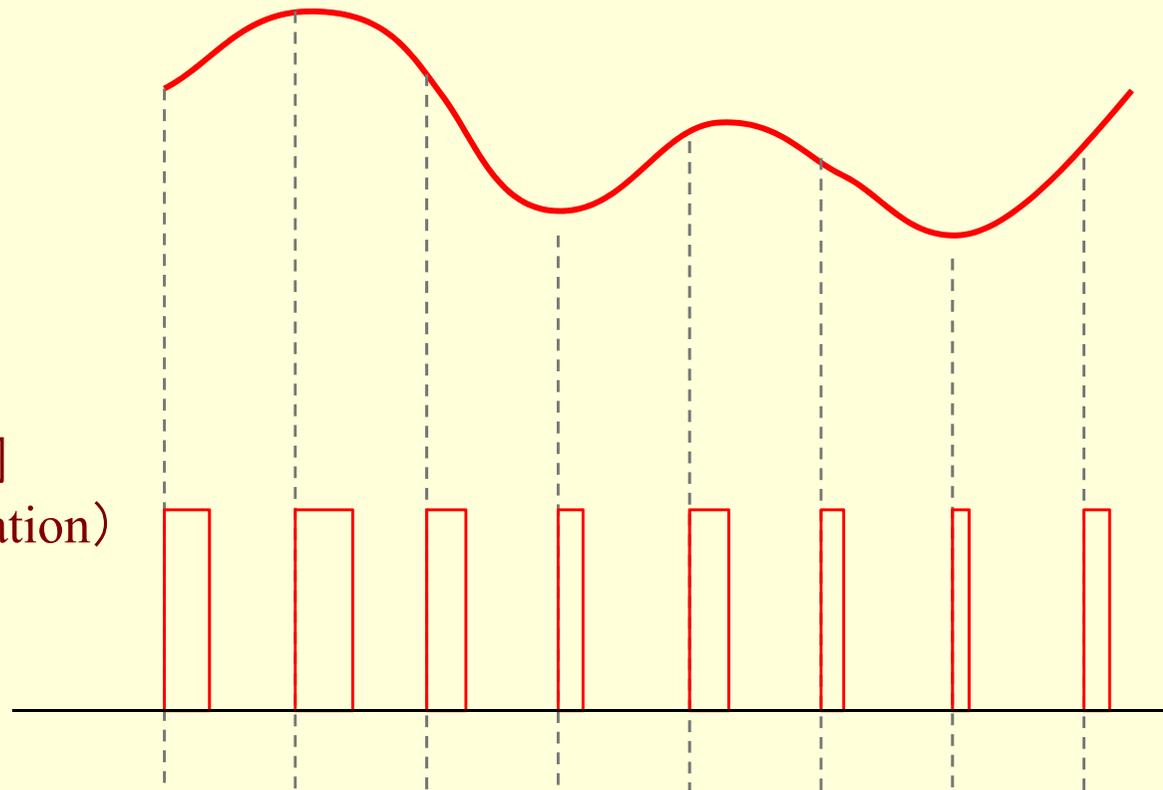
変調回路



AM、FM変調方式の相違

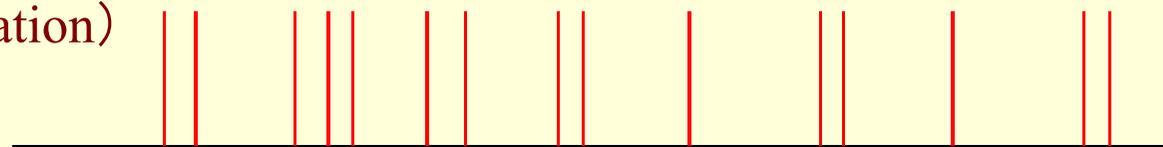
パルス変調(PM)方式

パルス幅変調
(Pulse width modulation)
PWM



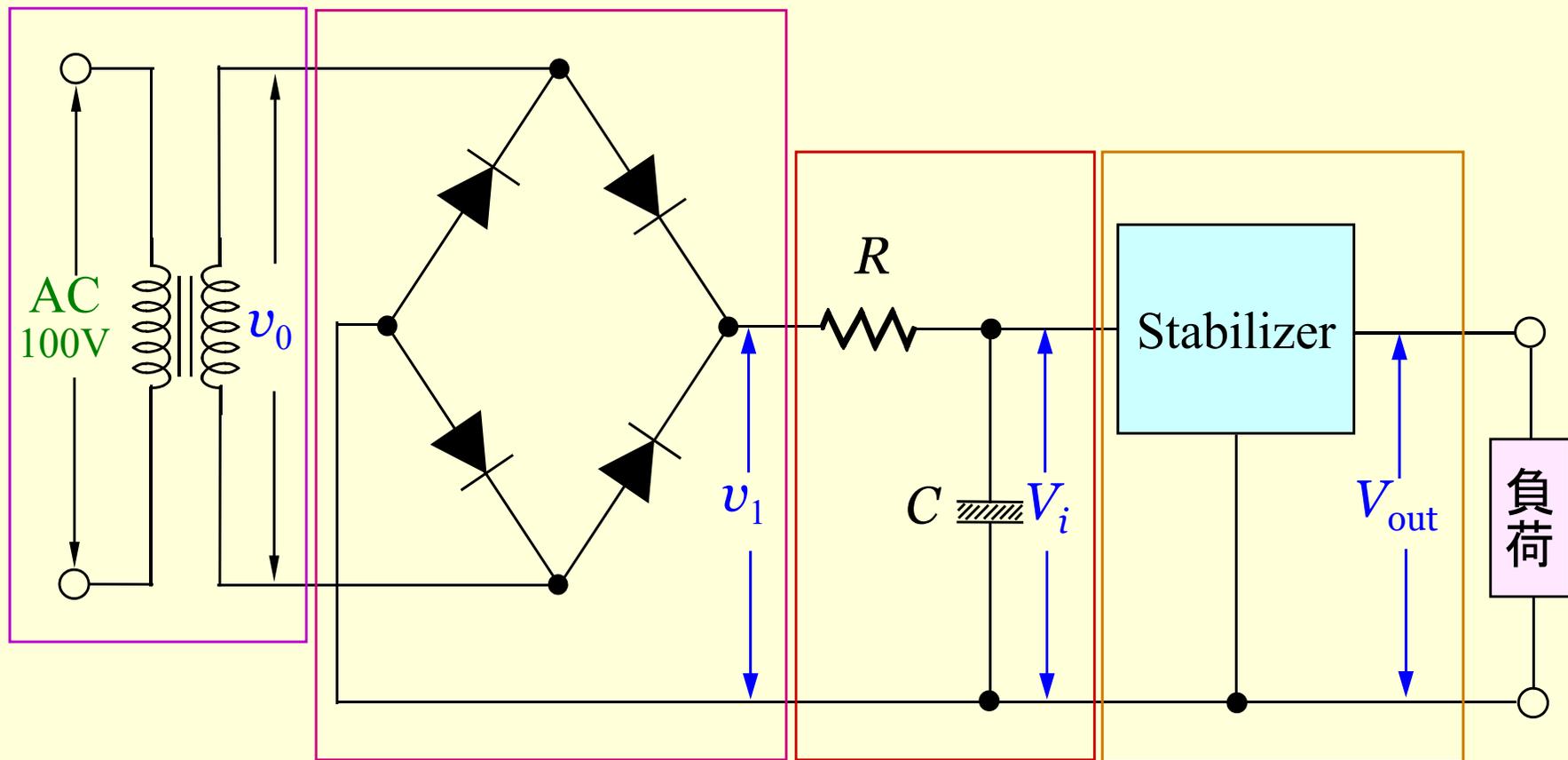
振幅をパルス幅に変換する

パルスコード変調
(Pulse code modulation)
PCM



振幅をパルス列に変換する

電源回路構成



変圧回路

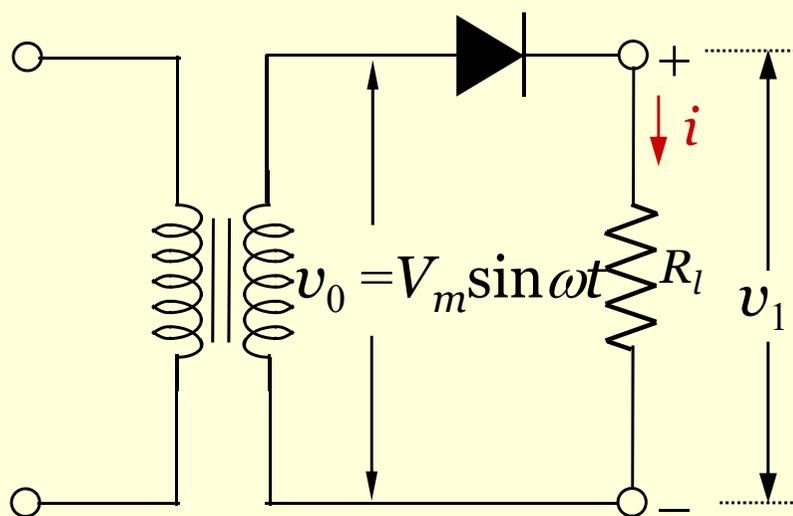
整流回路

平滑回路

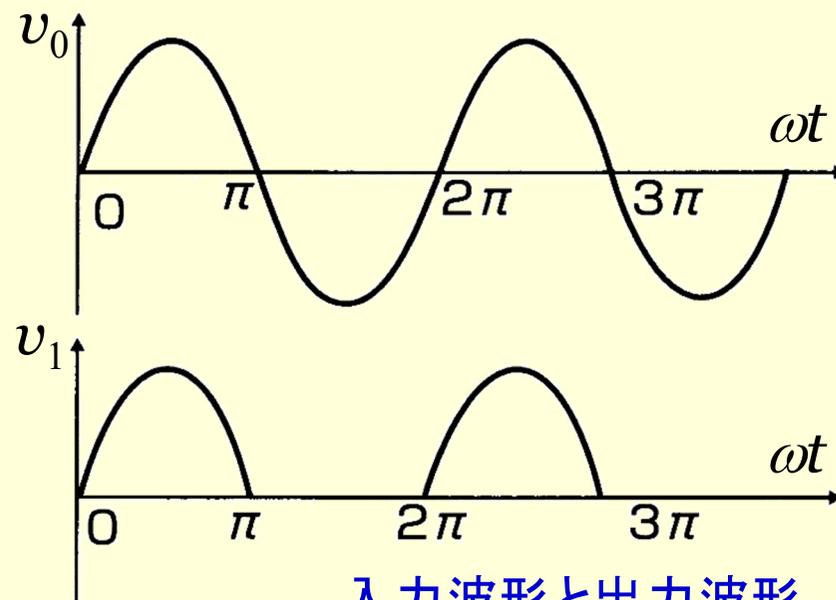
安定化回路

電源は変圧回路、整流回路、平滑回路、安定化回路の4つの回路からなり、変圧部では目的の直流電圧近傍まで電圧変換する。整流回路と平滑回路で必要直流電圧に波形整形後、リップルのない直流を得るために安定化する。

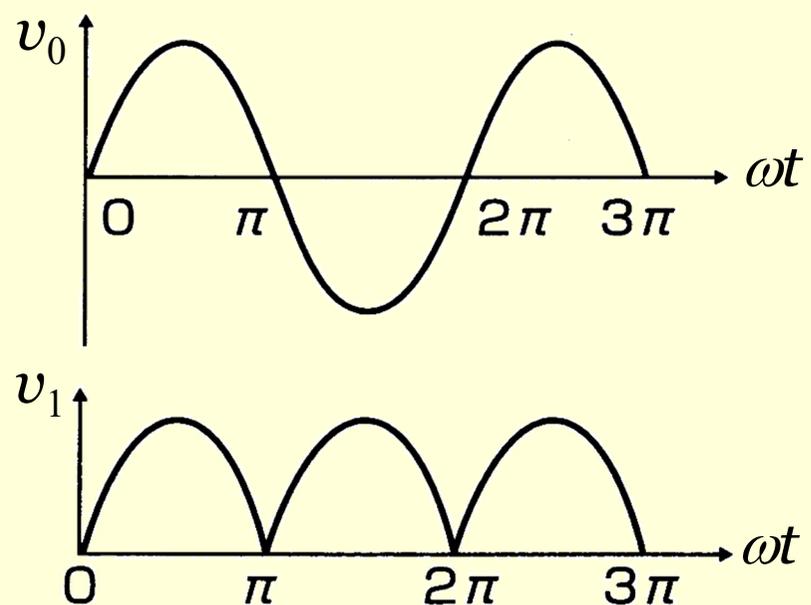
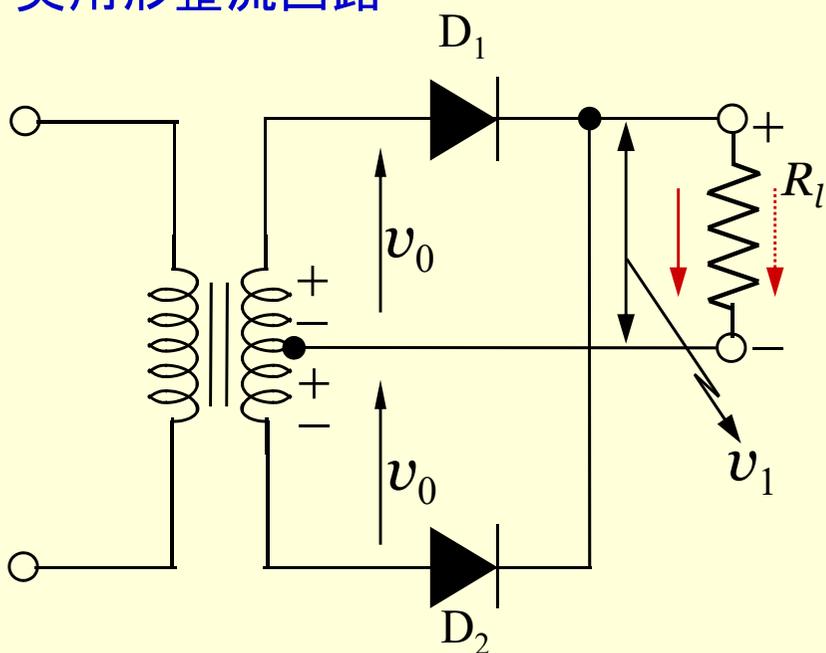
整流回路(半波整流と全波整流)



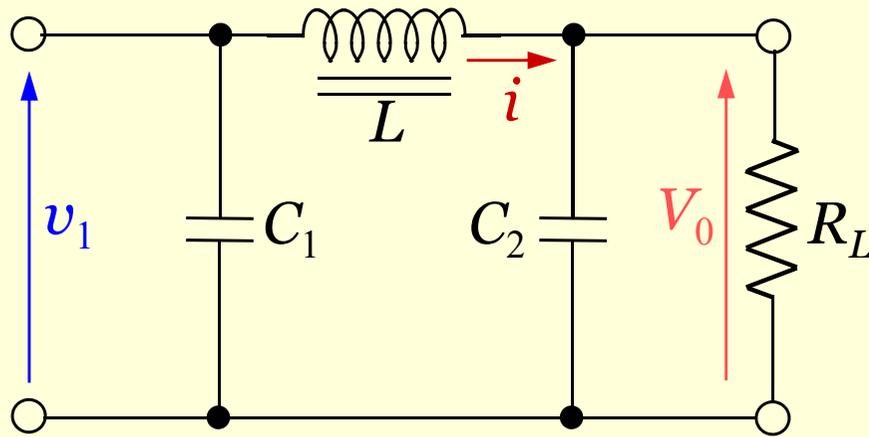
实用形整流回路



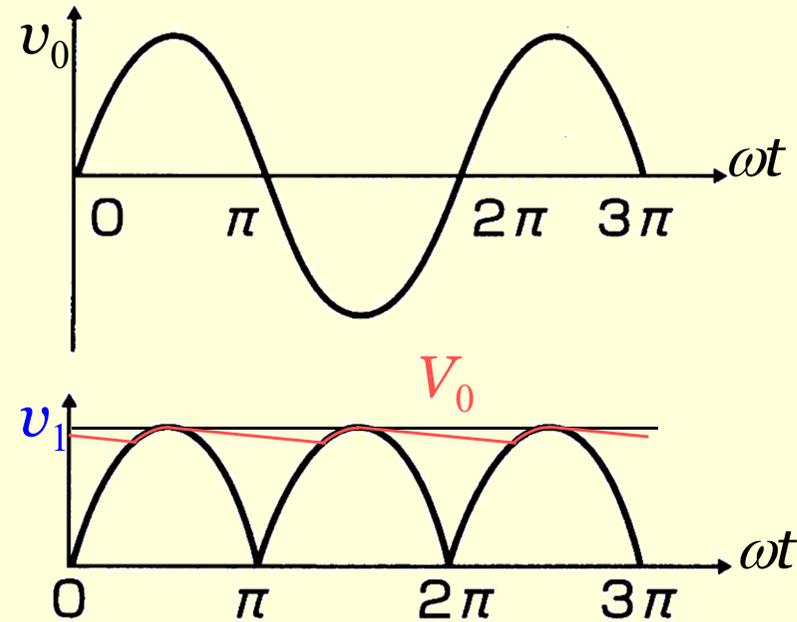
入力波形と出力波形



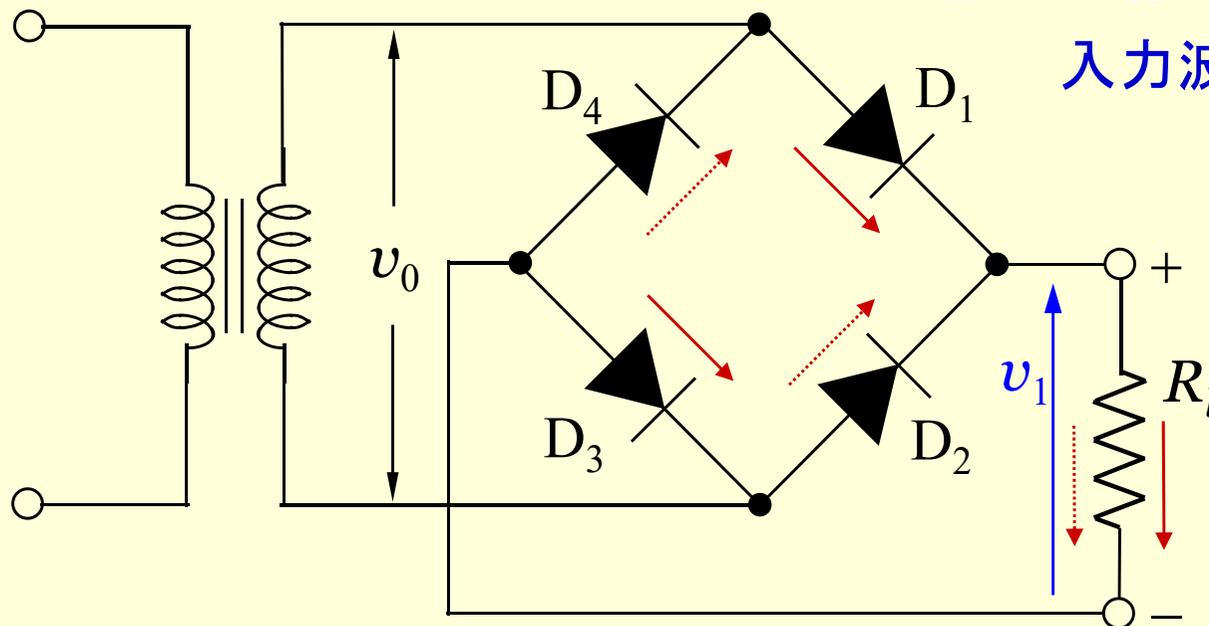
ブリッジ形整流回路と平滑化回路



平滑回路(凸凹を平滑するFilter)

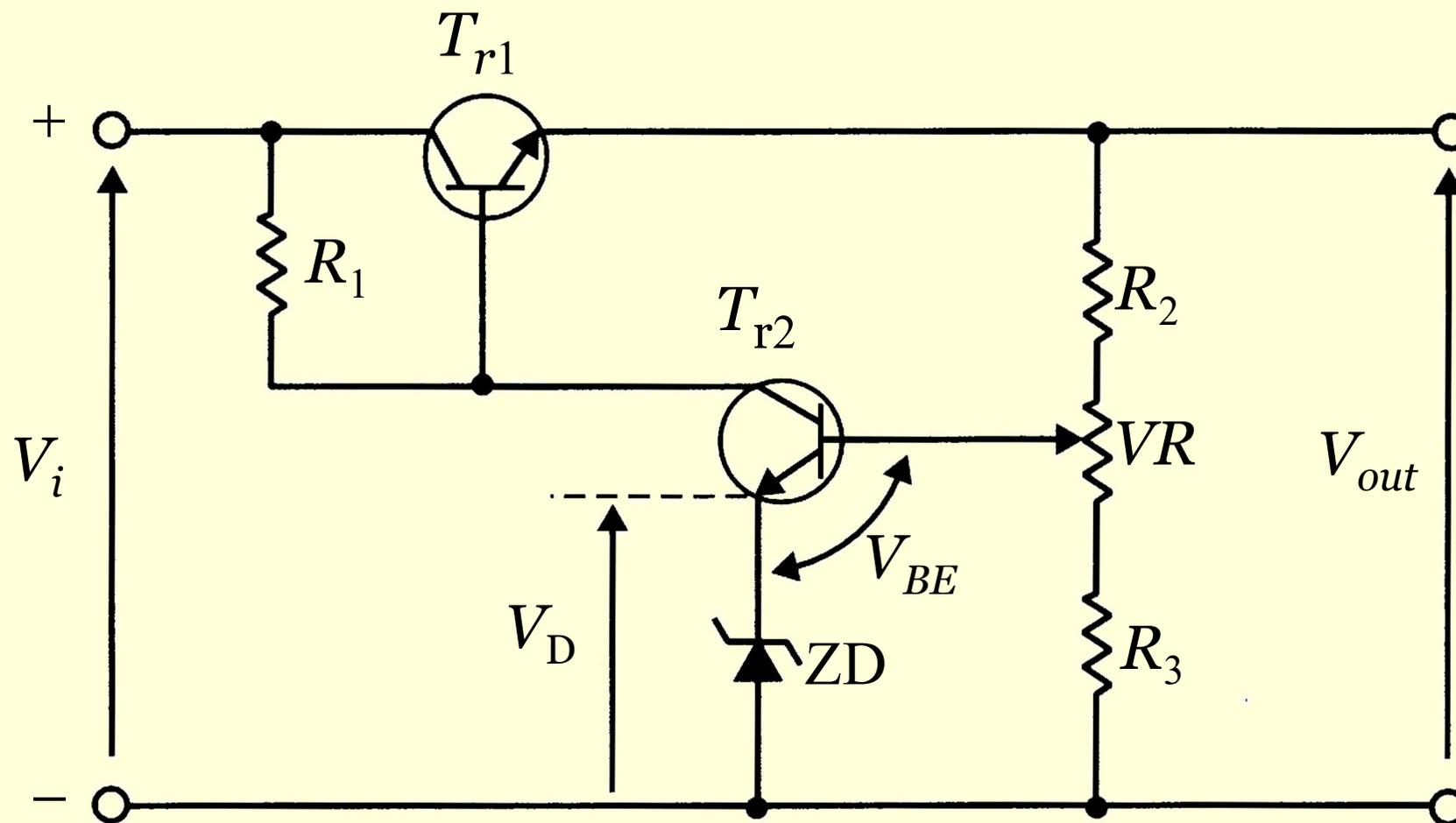


入力波形と出力波形



ブリッジ形
全波整流回路

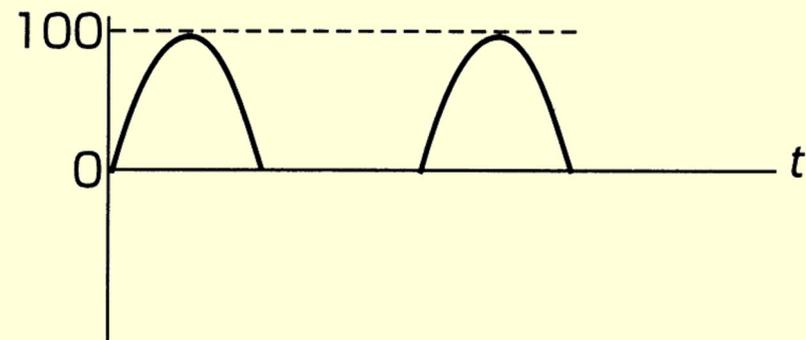
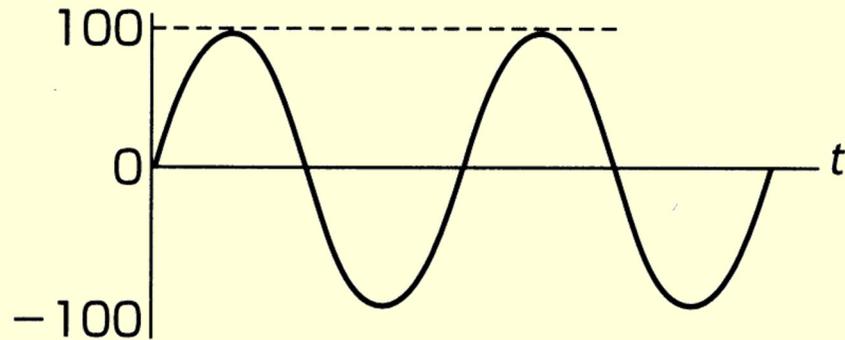
電源安定化回路



トランジスタとツェナダイオードによる電圧安定化回路を示す。 V_1 のリップル分を取り除いて完全な直流とし、また出力で負荷変動があっても出力電圧 V_2 に変化がないように安定化する回路。

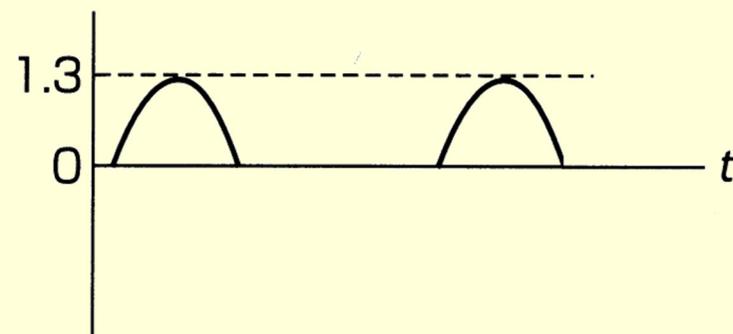
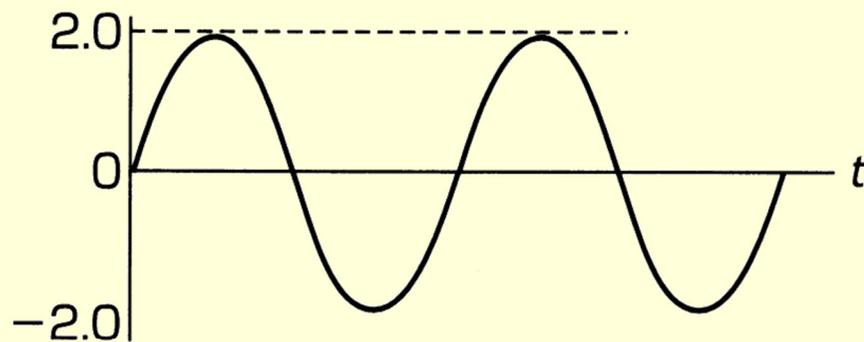
整流時の問題点

入力電圧が $100V_{pp}$ の場合



入力電圧が大きい場合は、ダイオードの順方向電圧降下が無視できる。

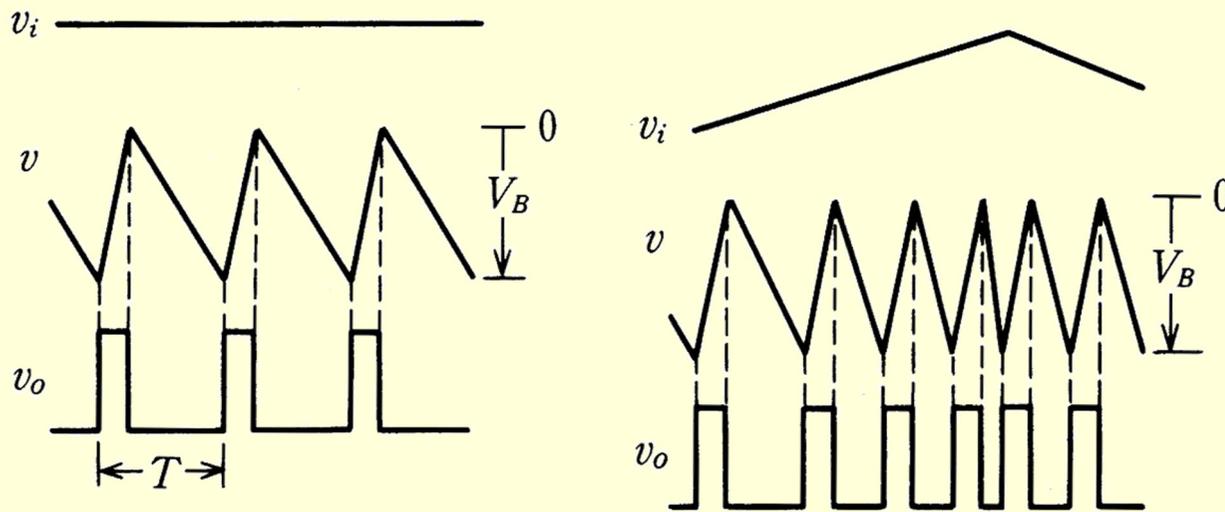
入力電圧が $2.0V_{pp}$ の場合



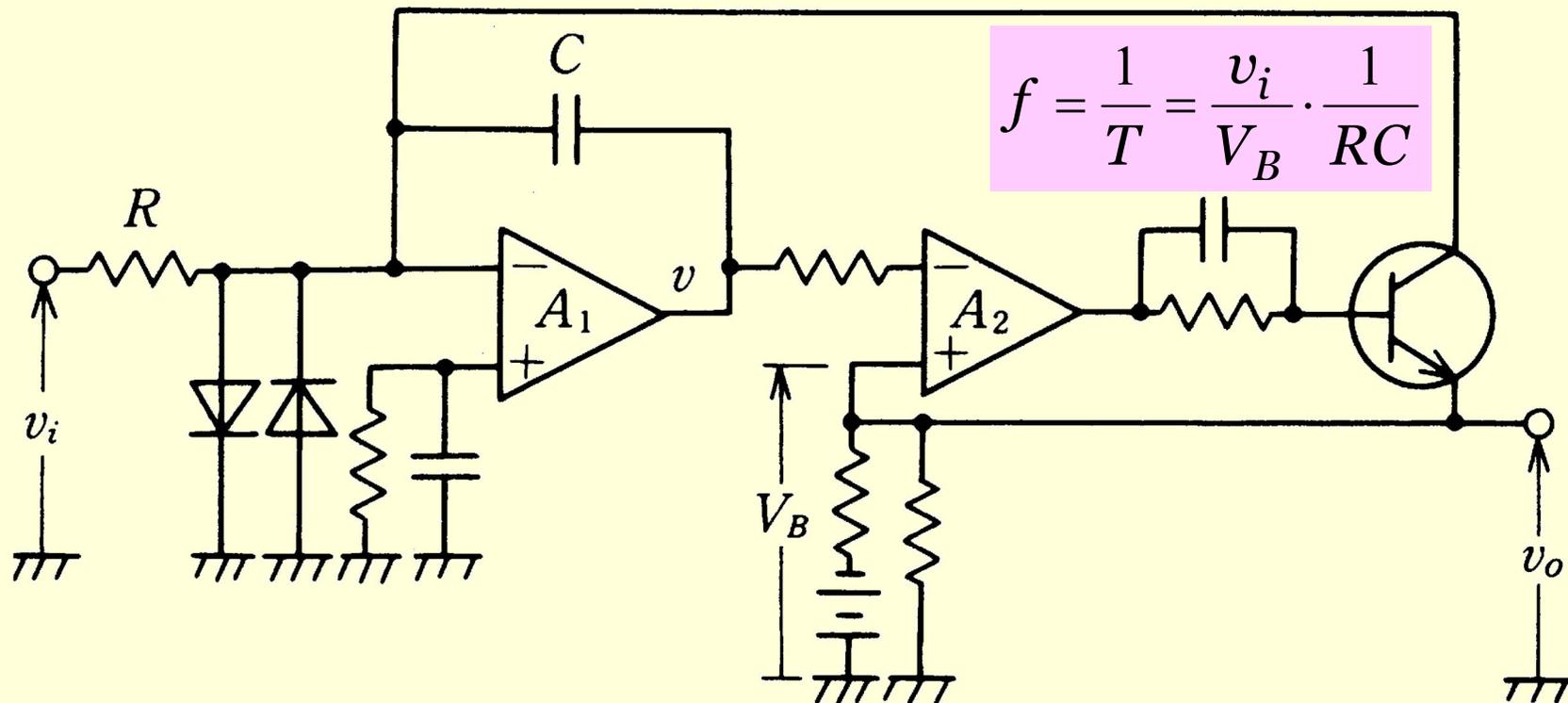
入力電圧が小さい場合は、ダイオードの順方向電圧降下（シリコンダイオードの場合 $0.5\sim 0.8V$ ）が無視できない。

その他の アナログ回路

Vfコンバータ(電圧-周波数変換回路)



電圧を周波数(パルス幅の周期の逆数)に変換する回路で、**アナログ量をデジタル量に変換する**時に用いる。A-D変換器の一種。

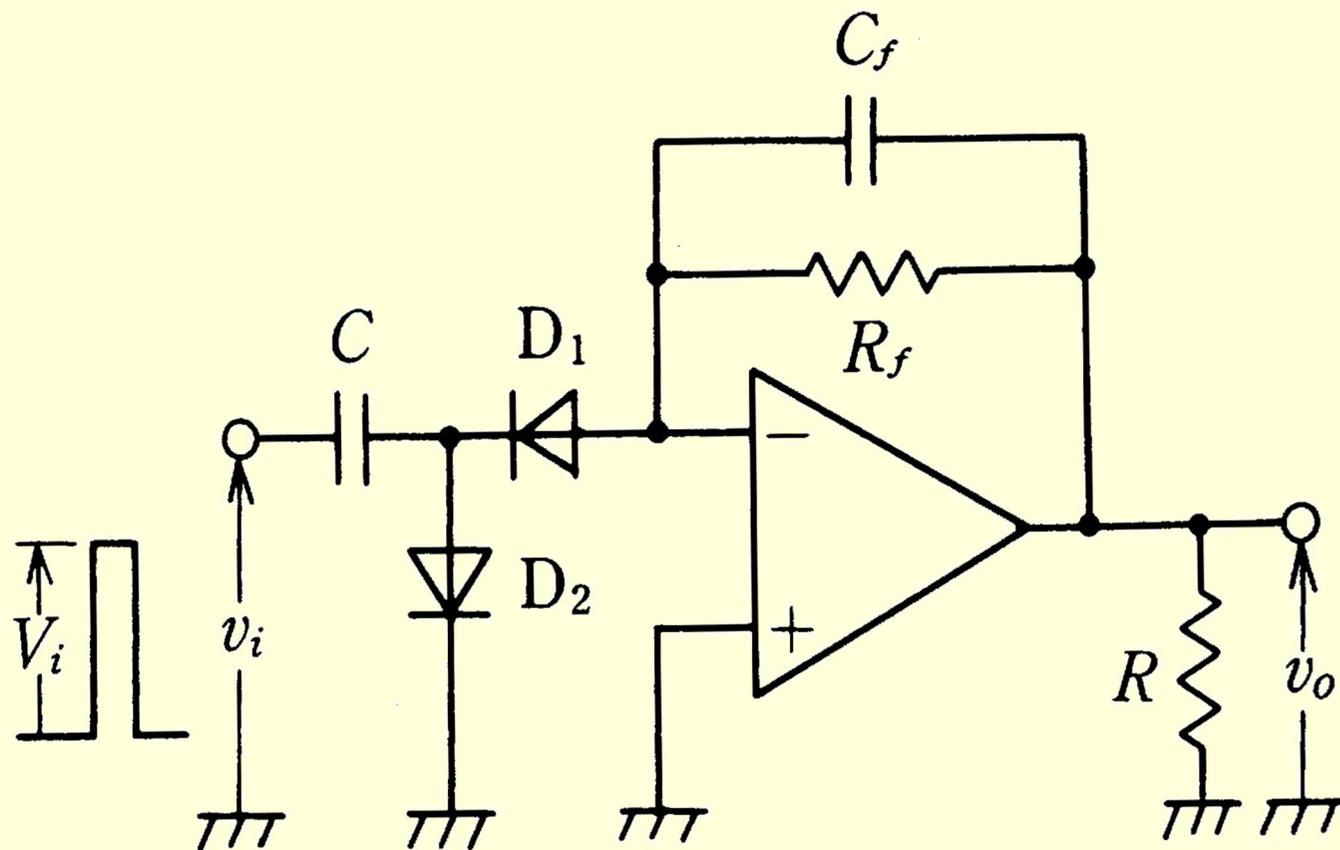


fV コンバータ(周波数-電圧変換回路)

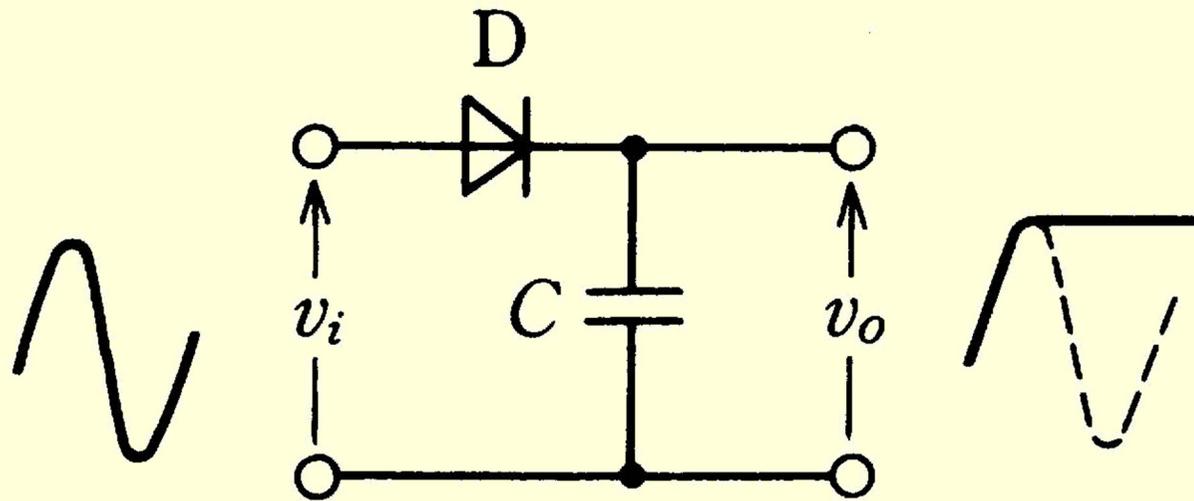
入力に波高値 V_i のパルスが加わるとダイオード D_1 、 D_2 を通して $Q = CV_i$ の電荷が C_f へ充電され、出力電圧を v_o とすると、

$$v_o = \frac{Q}{C_f} = \frac{C}{C_f} V_i$$

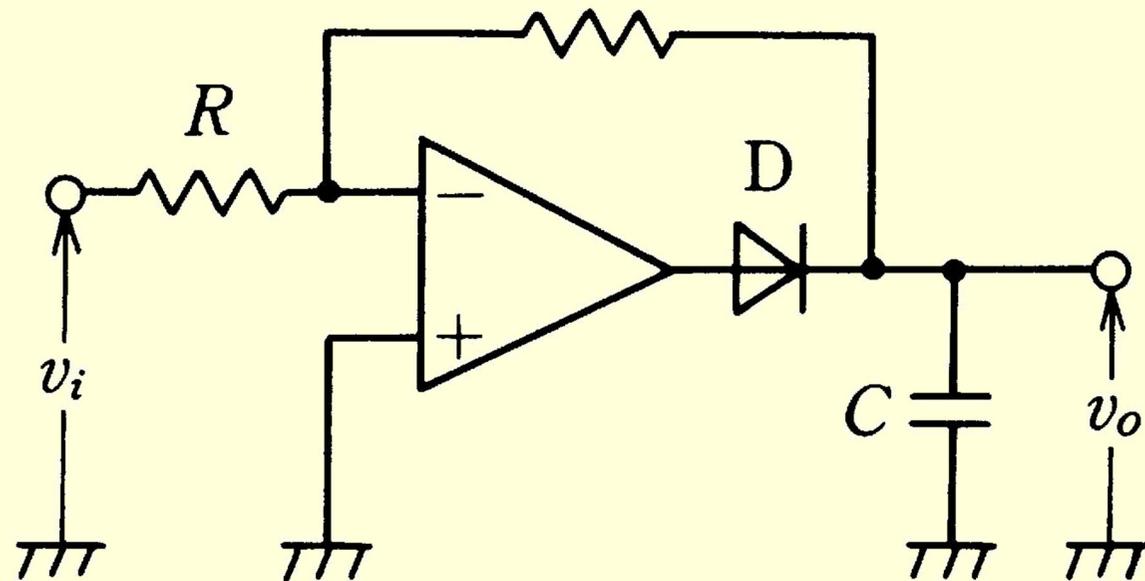
が出力される。続いてパルスが入力されると、出力電圧 v_o は波高が上式分だけ階段状に増加する。すなわち入力 V_i が加わるたびに出力 v_o は直線的に増加する。



ピーク値検出回路



入力電圧 v_i が容量 C の充電電圧よりも小さくなるとダイオード D がOFFとなると、 v_i のピーク値が C の電圧値として保持される。



利得1の反転増幅器を用いているが、スルーレートの小さい、素早い立ち上がりを示し、出力電流の大きなものが必要である。動作は上と同じ。