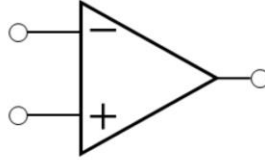


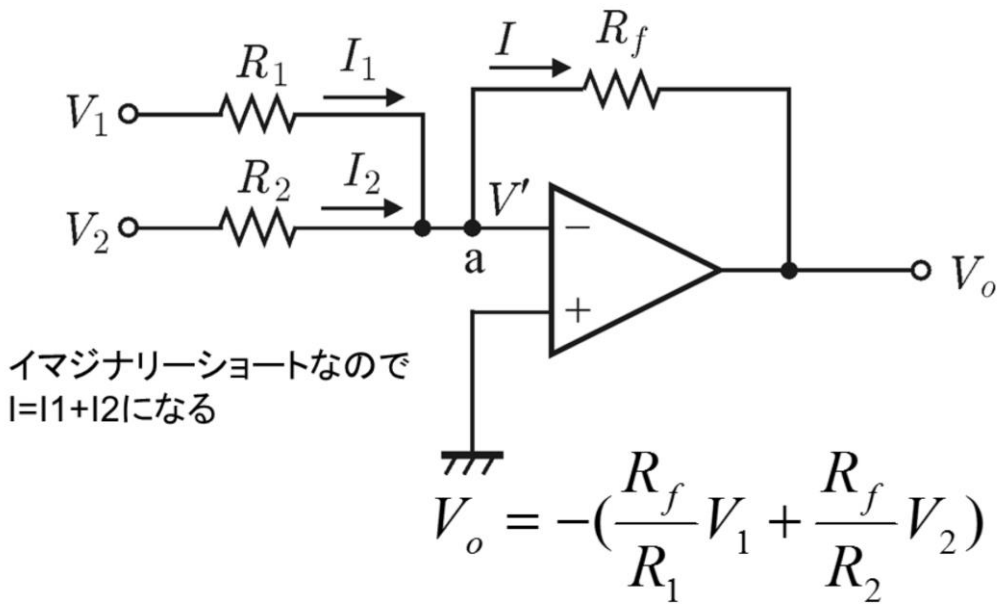
5. オペアンプ その2 魔法のレシピ



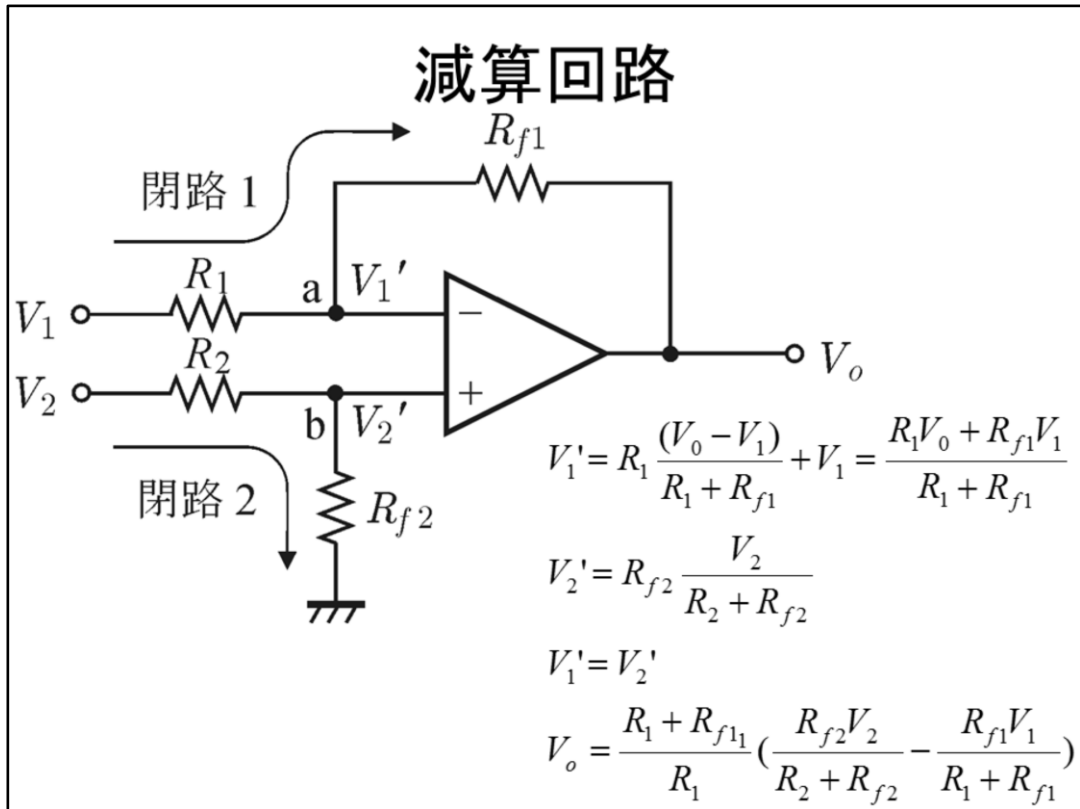
オペアンプとはOperational Amplifier =演算増幅器のこと
オペアンプで信号に対する様々な演算を行う回路を学ぶ

前回のオペアンプの動作はご理解いただけましたか？オペアンプはオペレーショナル
アプリファイアーすなわち演算増幅器の意味です。すなわち、信号に対して様々な演算
を行う回路なのです。今日はこの演算処理を紹介します。

加算回路

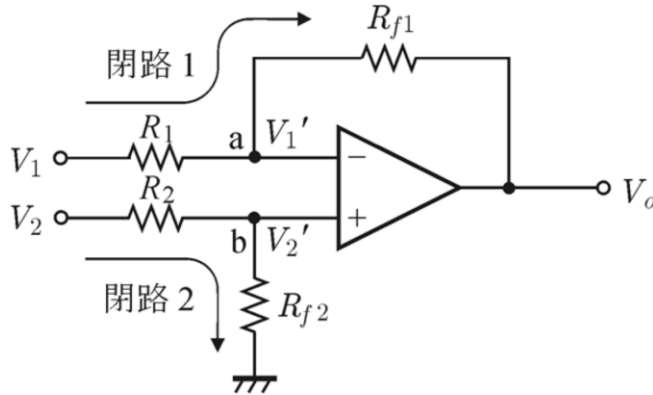


加算回路は最も基本的な演算回路で、反転増幅回路が元になっています。a点はイマジナリーショートなので、 $I_1+I_2=-I$ となります。また、 $V_o=R_f \times I$ 、 $V_1=R_1 \times I_1$ 、 $V_2=R_2 \times I_2$ なので、 $V_o=-R_f \times (V_1/R_1+V_2/R_2)$ になります。 $R_f=R_1=R_2$ とすると、 $V_o=-(V_1+V_2)$ で、加算回路になっていることがわかります。抵抗の比率を変えることで、入力電圧に重みを付けて加算することもできます。 R_f に対する比率で増幅率が決まります。



減算回路は、オペアンプ本来の差動増幅回路を使います。イマジナリーショートでa点とb点の電位は等しくなるので、Voはここに示す式で表すことができますが、全ての抵抗値が同じと考えると、Vo=V2-V1となります。加算回路と同様に抵抗の値を様々に設定することで減算の数値に荷重を与えることができます。

減算回路



$$V_o = \frac{R_1 + R_{f1}}{R_1} \left(\frac{R_{f2}}{R_2 + R_{f2}} V_2 - \frac{R_{f1}}{R_1 + R_{f1}} V_1 \right)$$

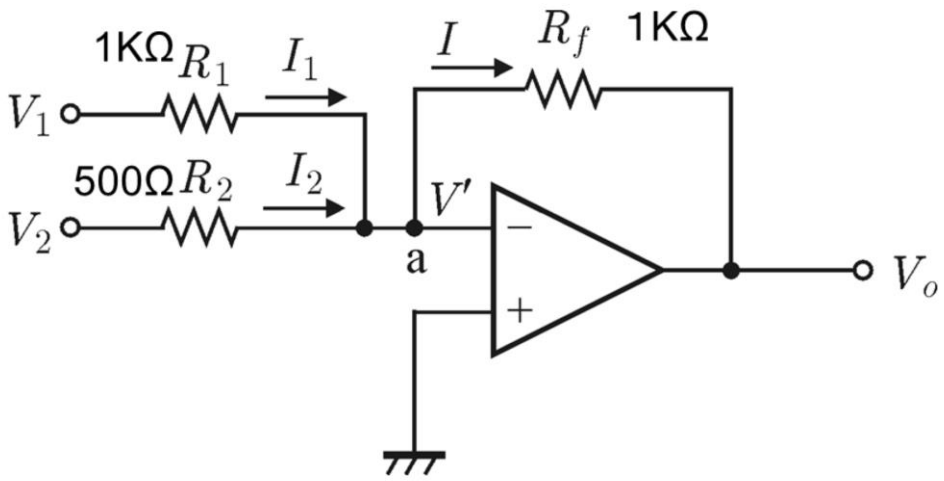
$R_1 = R_2 = R_i$, $R_{f1} = R_{f2} = R_f$ ならば

$$V_o = \frac{R_f}{R_i} (V_2 - V_1)$$

これは差分増幅回路でオペアンプの増幅回路の一般形

この例は、 $R_1 = R_2 = R_i$ (入力側抵抗) とし、 $R_{f1} = R_{f2} = R_f$ (フィードバック抵抗) とした例です。この場合引き算の結果に対して R_f/R_i 倍に増幅することができます。これは差分増幅回路になっており、オペアンプの基本的な増幅の方法です。

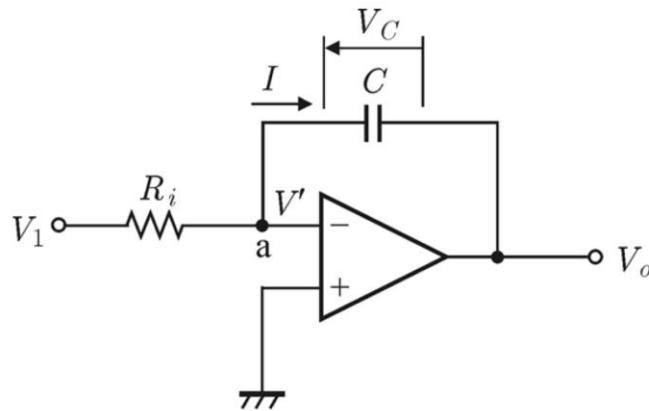
演習5-1



$V_1=1\text{V}$, $V_2=2\text{V}$ の時、 V_o はどうか？

では簡単な演習をやってみましょう。式を使ってもいいですがイマジナリーショート of の考え方をうとすぐできます。

積分回路

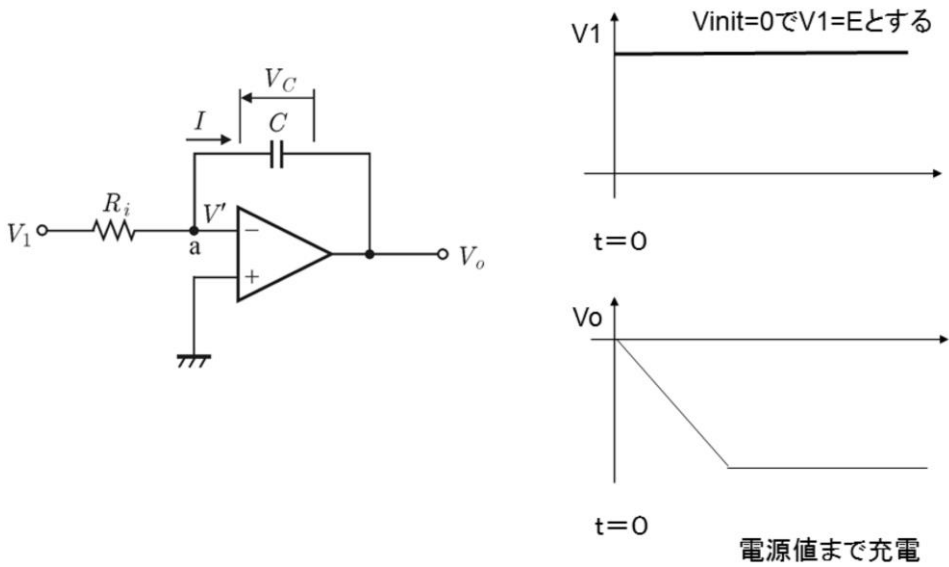


$$V_o = -\frac{1}{CRi} \int V_1 dt - V_{init}$$

VinitはV1に印加しはじめた際のコンデンサの初期電圧とする

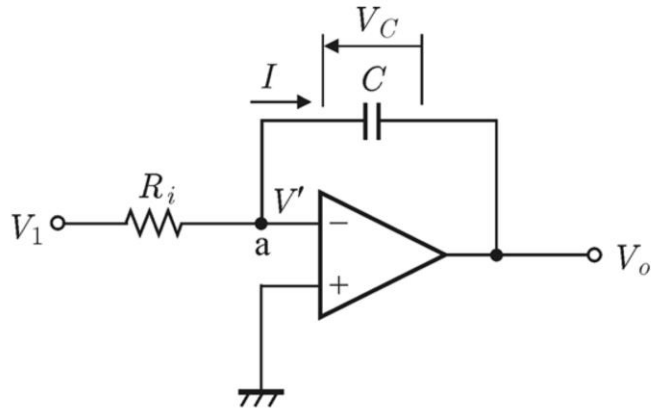
ではフィードバック抵抗の代わりにコンデンサを接続したらどうなるでしょうか？コンデンサの両端の電圧をVcとすると、 $Q = CVc$ ですので、 $dQ/dt = C \times dVc/dt$ となります。方向を考えると、 $I = -C \times dVc/dt$ です。 $I = V1/Ri$ なので、 $dVc/dt = -V1/CRi$ になります。 $V_o = Vc$ なので、ここは両辺を積分して $V_o = -1/C \int (V1) dt + V_{init}$ になります。すなわち、 V_o の値はV1の積分になっていることがわかります。ここで、VinitはV1に電圧を印加しはじめた時のコンデンサの初期電圧です。

積分回路



最初にコンデンサには全く電荷が充電されていなかったとします。ここで、一定値Eを V_1 に与えます。出力 V_o はどのようなでしょう？電荷はどんどんコンデンサに充電されるので、 V_o は直線的にマイナス側に増加していきます。ついにはオペアンプの電源の値に達して、これ以上増加できなくなり、一定値になります。

積分回路の式



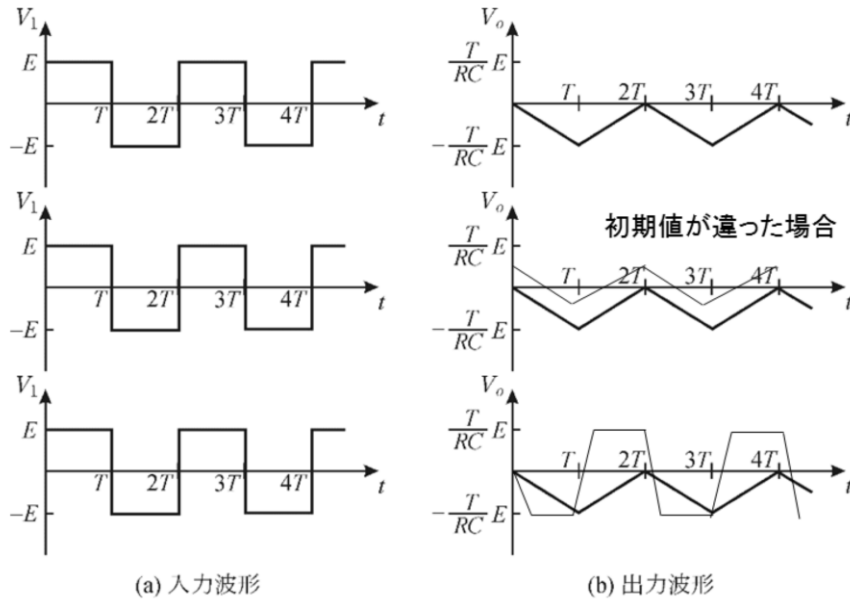
$V_{init}=0$ とすると
 $Q=CV_c$
 $V_c=Q/C$
 $Q=\int I dt$ なので

$$V_c = \frac{1}{C} \int I dt \quad \xrightarrow{I=V_1/R_i} \quad V_c = \frac{1}{CR_i} \int V_1 dt$$

$$V_o = -\frac{1}{CR_i} \int V_1 dt$$

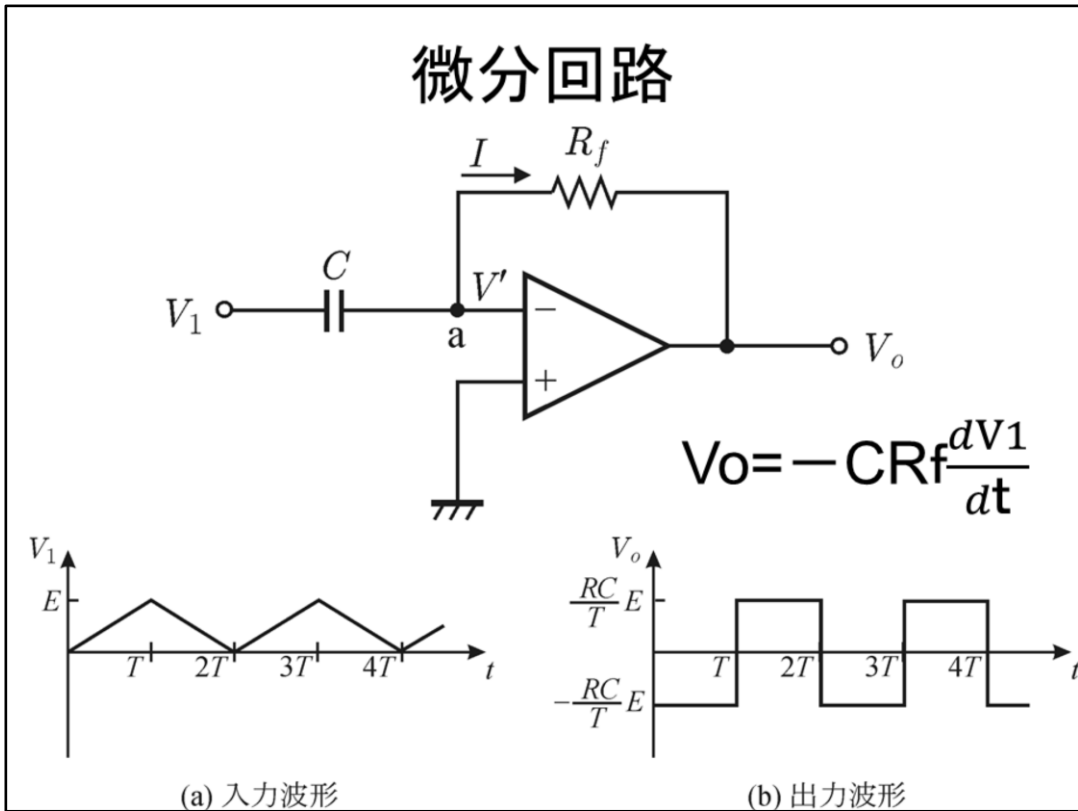
式の変形を行って確かめましょう。

正負に振った入力波形 出力はCRの値や初期値によりけり



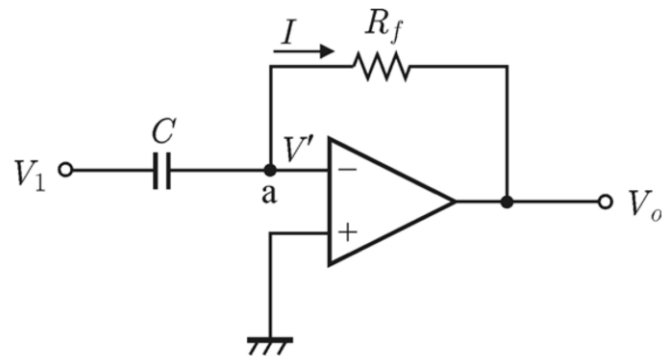
入力電圧 V_1 を正負に変化すれば、電流の方向が逆転するので、電荷が放出されます。一番上のグラフは、初期値が0であった場合です。入力をプラス方向にした時間と同じだけマイナス方向にすると0に戻ります。しかし、初期値がある程度の電圧であった場合は、この分だけずれます。また、 CR の値によってはすぐに出力は飽和してしまい、最後のグラフのように台形になります。

微分回路



コンデンサと抵抗を入れ替えると微分回路を作ることができます。今、 $Q=CV_1$ なので、 $I=C \frac{dV_1}{dt}$ になります。この電流はそのまま R_f を流れるので、 $V_o = -CR_f \frac{dV_1}{dt}$ となります。つまり、入力の変化が一定の場合には出力には一定値が表れます。(a)に示すように一定の割合で上昇すると、それに応じた一定値出力が表れます(方向が逆な点にご注意ください)。電圧を一定の割合で下げると、この傾きに応じた出力が表れます。これが微分回路です。入りにステップ応答を与えると、出力にはパルスが表れます(これは描くのが難しいです)。

微分回路の式



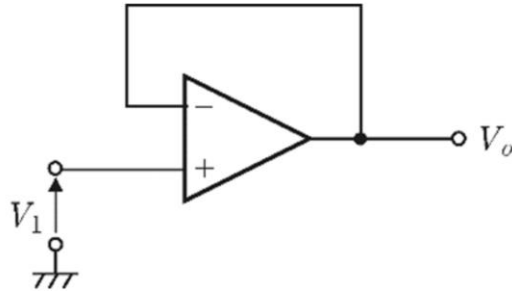
$$Q = CV$$

$$I = C \frac{dV_1}{dt}$$

$$V_o = -CR_f \frac{dV_1}{dt}$$

式を確認しましょう。

ボルテージフォロア



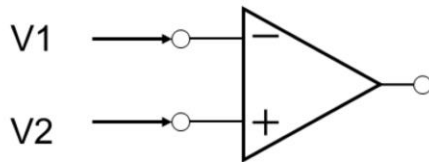
$V_o = V_1$ となる

何の意味があるか？

入力インピーダンスが大きいので初段に適している

V_o を直接入力にフィードバックし、同相入力を与えた回路がボルテージフォロアです。イマジナリーショートにより、 $V_o = V_1$ となることが分かります。ちっとも増幅しないのでいいことがないような気がしますが、入力インピーダンスが大きく、出力インピーダンスが小さいので、弱い信号の入力回路や、不安定な負荷に対する出力回路に良く用います。この回路をボルテージフォロアと呼びます。

コンパレータ



出力:

$V2 - V1 > 0$ マイナス方向に振り切る

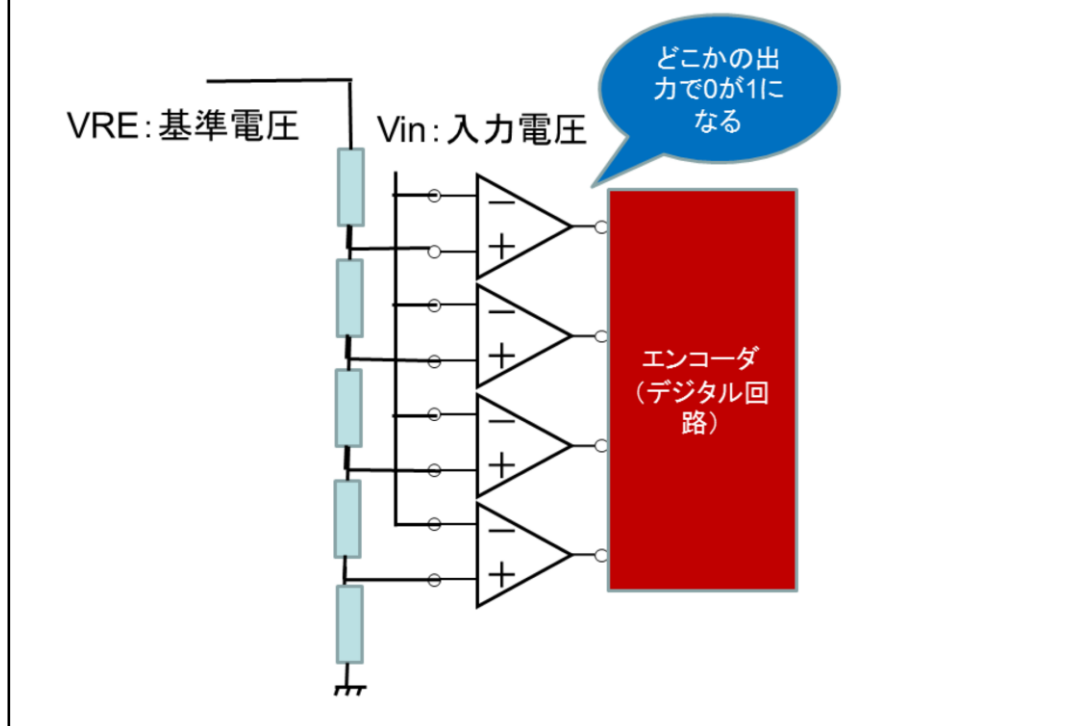
$V2 - V1 < 0$ プラス方向に振り切る

帰還を掛けないオペアンプはコンパレータとして使える

しかし、感度が良すぎるので、帰還を掛けて引き算器同様にしたり、内部構造をコンパレータ専用のICとして使われている。

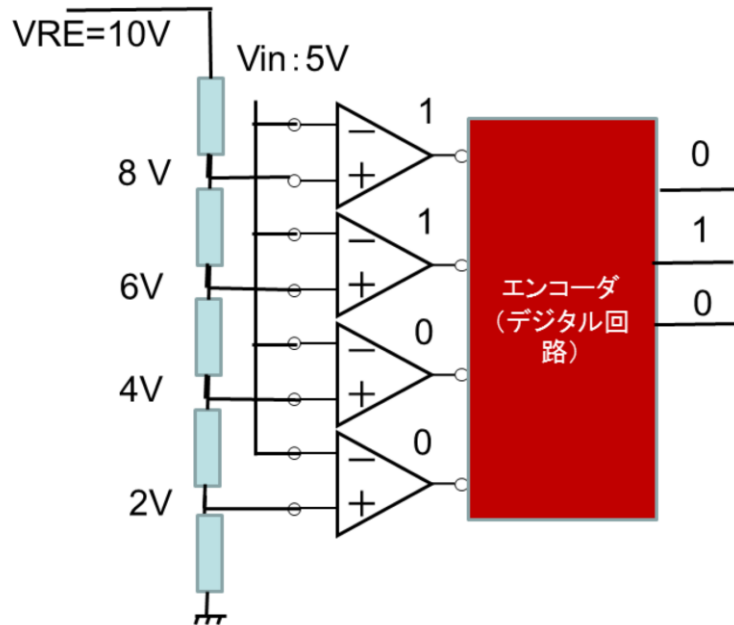
オペアンプは入力の差分を増幅するので、それだけでコンパレータ(比較器)として使います。コンパレータは入力の電圧のどちらが大きいかを判定する回路です。しかし、オペアンプをそのまま使うと安定性が悪いので、帰還を掛けて引き算器にして(引き算器って一種のコンパレータだ)使ったりします。あるいは内部構造に変更を加えたものをコンパレータ専用のICとして売っています。

A/Dコンバータ フラッシュ型



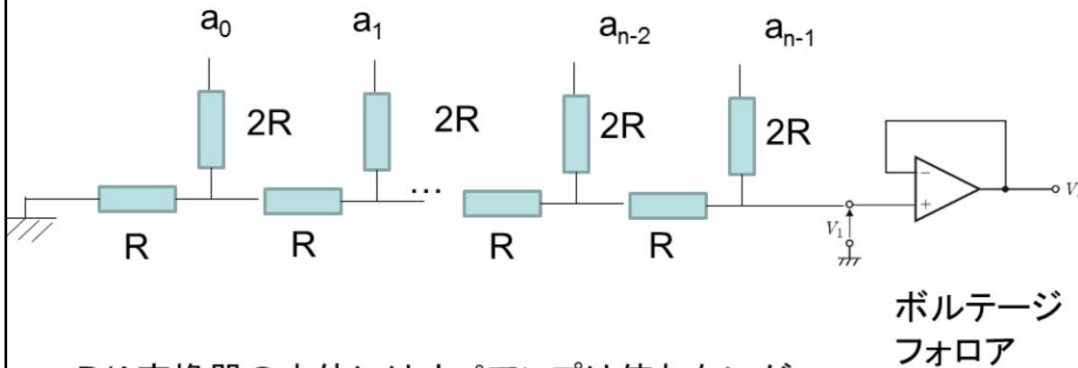
コンパレータを利用した回路の代表がA/Dコンバータのフラッシュ型です。A/Dコンバータはアナログ、デジタル変換器のことで、アナログ入力を対応するデジタル出力に変換します。この回路では基準電圧を抵抗分割して一定の間隔の電圧を作ります。これと入力を比較すると、どこかから上は0、それ以下は1になります。これをデジタル回路で2桁の2進数に変換(エンコーダと呼ぶ回路)すればデジタル信号に変換できます。この場合は解像度が2ビットで低いのですが、たくさん使えば解像度を上げることができます。ちなみにA/Dコンバータはこの他にも山ほど種類がありますが、多くの回路でオペアンプを利用します。A/Dコンバータの逆でデジタル出力をアナログ出力に変換する回路をD/Aコンバータと呼びます。こちらはオペアンプなしで作ることも可能です。

A/Dコンバータの動作



ここでは、10Vを基準電圧として、 $V_{in}=5V$ を与えた例を示します。入力電圧によってコンパレータの出力は上から順に1111(2V未満)から0000(8Vより大きい)までの5段階のうちどれかになります。5Vを入れた時は1100が出力されます。これを2進数に変換するエンコーダをデジタル回路で用意しておけば、アナログ電圧に応じたデジタル出力を取り出すことができます。もちろん、これはちょっと解像度が小さすぎますが、もっとたくさんコンパレータを使うことで上げることができます。

D/Aコンバータ 抵抗ラダー型



D/A変換器の本体にはオペアンプは使わないが
生成されたアナログ出力を強化、整形する目的で
利用する

逆にデジタル出力をアナログ電圧に変換する回路をD/Aコンバータ(変換器)と呼びます。この例は、抵抗ラダー型で、 $a_{n-1} - a_0$ の所にデジタル出力を与えると桁数に応じた 2^n の電圧が生じ、これらが合わさった電圧が出力されます。これをボルテージフォロアで受ければアナログ出力として利用可能になります。このようにD/Aコンバータの本体にはオペアンプは使いませんが、生成されたアナログ出力を整形したり、強化したりする目的で使われます。

A/D、D/Aコンバータは奥が深い

- A/Dコンバータ
 - フラッシュ型(今回紹介したもの)
 - パイプライン型
 - 逐次比較型など
- D/Aコンバータ
 - パルス幅変調型
 - デルタシグマ型
 - 抵抗ストリング型
 - 抵抗ラダー型
 - 抵抗アレイ型(今回紹介したもの)など

ちなみにA/D,D/Aコンバータはここに紹介したもののほかに方式が色々あって奥が深いです。それぞれ、動作速度、分解能、コスト、消費電力などに特徴があります。現在も開発競争が進んでおり、大学のアナログ屋さんの研究分野としてホットなものであり続けています(日本は特に研究が盛んだそうです)。

他の応用回路

- CとRを直並列に付けることでローパスフィルタ、ハイパスフィルタ回路
- 発振回路
- 対数増幅回路
- 定電流回路

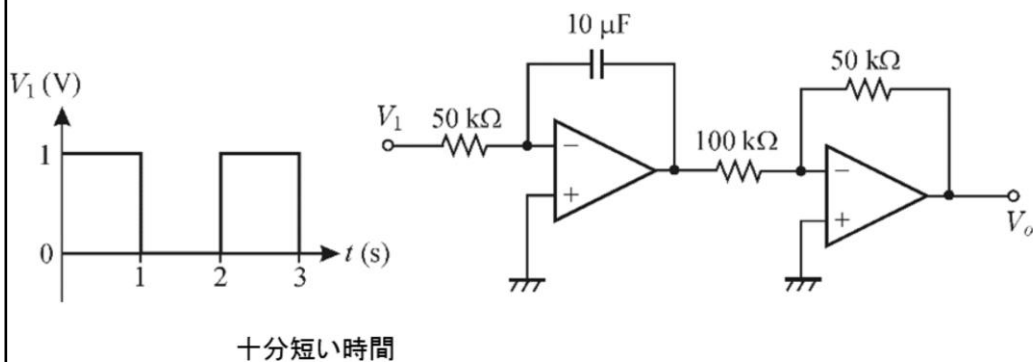
オペアンプは、今までに紹介した特性を利用して様々な回路に利用します。微分回路、積分回路の発展系としてローパスフィルタ、ハイパスフィルタなどのフィルタ回路を作ることができます。さらに発振回路、対数増幅回路、定電流回路など、様々なアナログ回路に用います。

オペアンプが苦手なところ

- 高周波数帯
 - 通常数MHzから数十MHz程度の帯域で使われる
 - それを上回る場合はトランジスタやFETを直接用いた回路を使う
 - 高周波用の特殊なオペアンプも使われている
- パワー用途
 - パワー用のオペアンプは存在するが、メリットが少ない

一方、オペアンプが苦手な分野もあります。まず、オペアンプの動作は通常数MHzから数十MHz程度の帯域で使います。これを上回る場合は、トランジスタや、後に紹介するFETを使って直接増幅します。最近では高周波用の特殊なオペアンプが使われる場合もあります。また、パワー用途には大型のトランジスタを直接使う場合が多いです。

演習5-2



入力信号 V_1 を与えたときに、出力信号 V_o の略図を描け
入力の変化は CR に対して短いとする。
出力は2回のパルスでは飽和しないとする。

この演習は8ページの例題に似ていますが、入力が+方向のみである点に個注意ください。

今日のポイント

オペアンプを使ってアナログ的な演算が可能です。

加算回路 $V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2\right)$

積分回路 $V_o = -\frac{1}{CR_i} \int V_1 dt - V_{init}$

微分回路 $V_o = -CR_f \frac{dV_1}{dt}$



インフォ丸がまとめた今日のポイントはこの3つです。