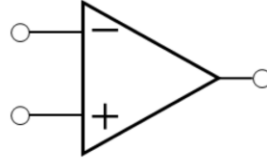


4. オペアンプ

オペアンプは魔術の世界
魔法の言葉は「イマジナリーショート」



理想の増幅器の集積回路: IC (Integrated Circuits)

理想的すぎるため、

割り切ってしまうと分かりやすい

悩むと大変

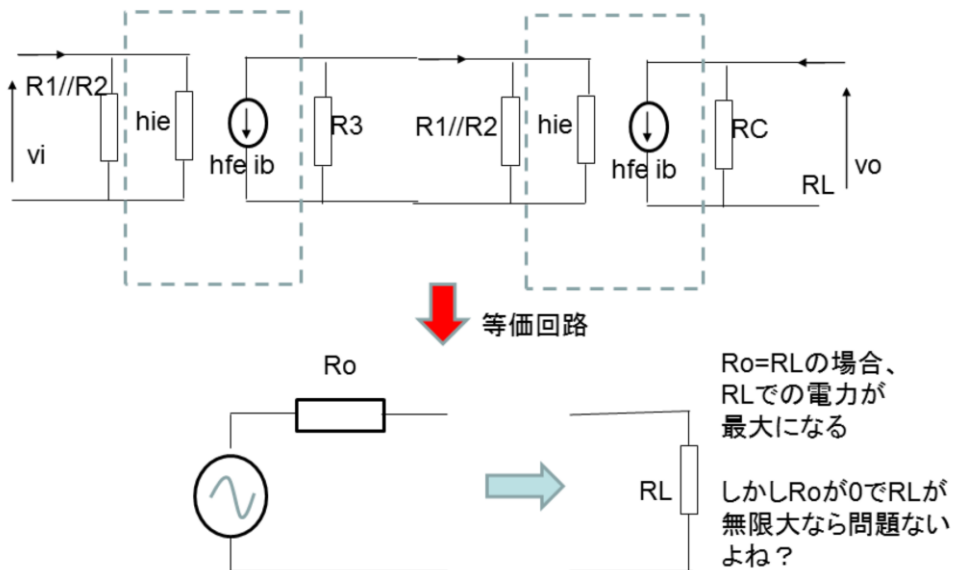
超高速、パワー領域を除いてあらゆる分野で用いられる

暴れ馬みたいにそのままでは使えない

たづな=負帰還が必要！

現在、実際のアナログ回路では、今まで紹介したトランジスタを使うのではなく、オペアンプを使う場合が多いです。オペアンプは単体の素子ではなく、多数の素子を半導体上に搭載した集積回路IC (Integrated Circuits) で実装されます。オペアンプはまさに理想の増幅器の特性を持っており、それが余りにも理想的すぎるため、信じられないようなことが起きてしまい、案外理解するのが難しいです。ある程度割り切って考えましょう。基本的にオペアンプは負帰還を付けて使います。

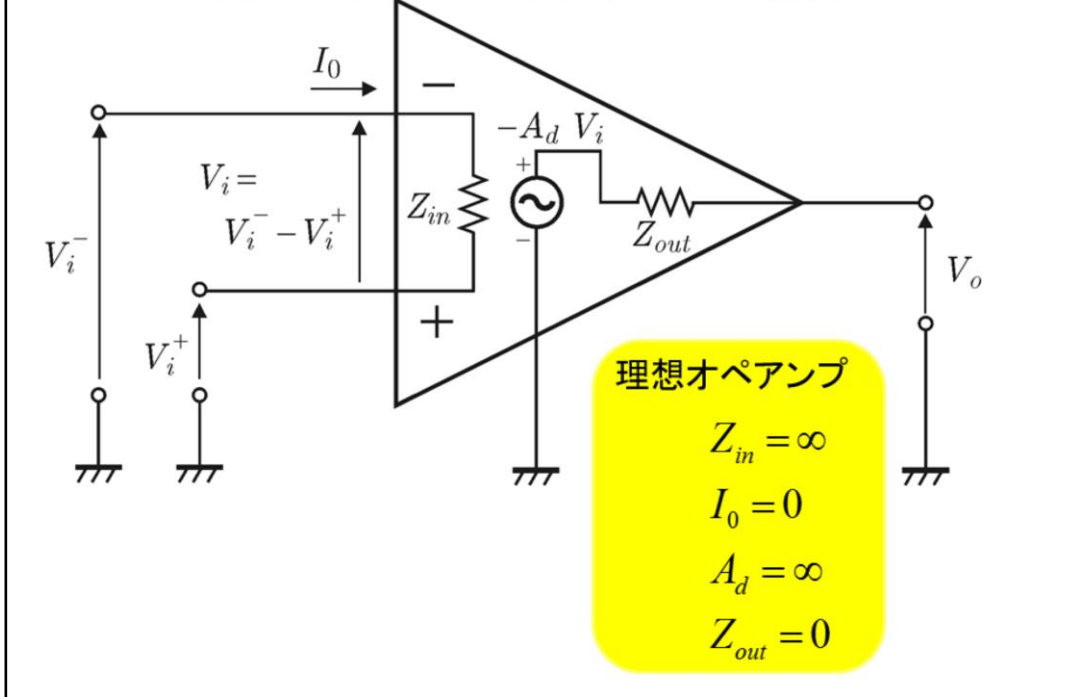
理想の増幅器って何？



前回解説したように、増幅器は出力側から見た抵抗 R_o を出力インピーダンス、入力側から見た抵抗 R_L を入力インピーダンスと呼びます。今までやってきたトランジスタの等価回路に対して入力出力インピーダンスを考えると下の回路になります。ここで、2つの増幅回路を接続する場合に、 R_L が小さいと電流がたくさん流れて R_o での電圧降下が大きくなり、 R_L の両端の電圧が減ります。逆に R_L が大きいと、 R_L の両端の電圧が大きくなる一方で、流れ込む電流が減ってしまいます。すなわち、出力側のインピーダンス R_o と入力側のインピーダンス R_L が等しい場合に最大の電力を受け渡すことができます。これをインピーダンス整合（マッチング）と呼びました。しかし、インピーダンスマッチングをしたと言っても、損失がなくなるわけではないです。

では、ここで R_o が0ならばどうでしょう？ R_L がいくつであっても損失0です。あるいは R_L が無限大ならばどうでしょう？これも損失はなくなります。これが理想の増幅器と考えられます。

オペアンプの等価回路

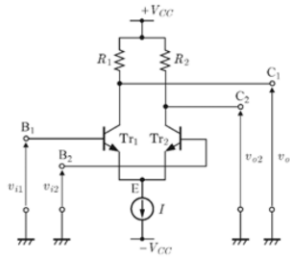


オペアンプは、入力インピーダンスが無限大、出力インピーダンスが0、増幅度が無限大という理想の増幅器です。

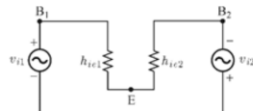
しかしこれが今までの増幅回路とちょっと違うのは、二つの入力があって、この差分が入力となる点です。

オペアンプの動作を等価回路から考えます。この等価回路は一般的な差動電圧増幅器のものです。入力電圧 V_i は、二つの入力の差分と考えられます。この差分の電圧が出力側に $-A_d V_i$ として現れ、これを Z_{out} を介して取り出します。ここで、オペアンプの凄いところは、入力インピーダンス Z_{in} は無限大であり、このため、電流は全く流れ込みません。そして差動利得(電圧増幅率) A_d は無限大で、出力抵抗は0です。すなわち、 V_i の変化は無限大の大きさと増幅されることになります。

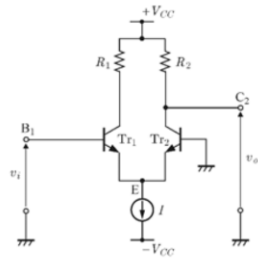
オペアンプの元は差動増幅回路
 実際のオペアンプのICにはもっと複雑な回路が入っている



(a) 差動増幅回路



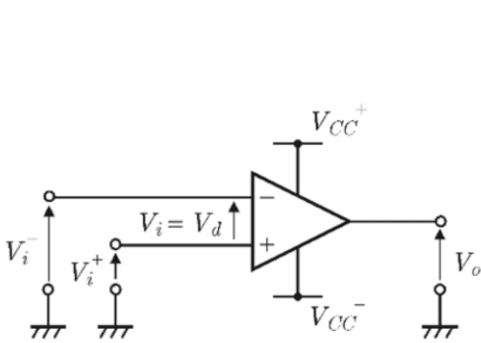
(b) 逆相入力に対する等価回路



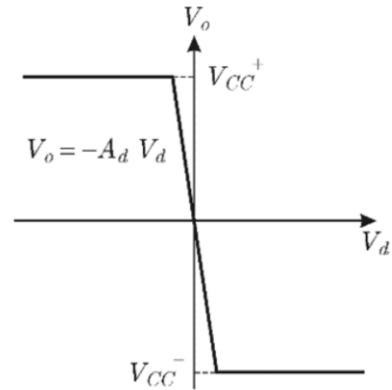
(c) 差動増幅回路 (片側入力が接地されているとき)

この理想の増幅器がオペアンプの元となる差動増幅回路です。これは、二つのトランジスタのエミッタを共通に接続して、ここに一定の電流が流れるようにし、ベースの電圧差をコレクタ側に取り出す回路です。ここでは電流源として書いてある部分には実は別のトランジスタの回路を使います。実際のオペアンプのICにはもっと複雑な回路が入っていますが、基本的にはこの回路が元になっています。

差動利得は無限大だが、 ±Vcc以上の出力レベルは出ない



(a) 差動入力電圧

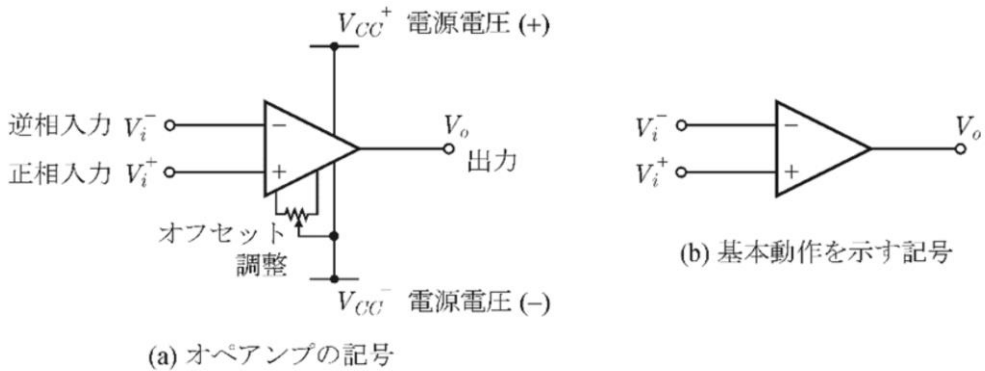


(b) 差動入力電圧と出力電圧の関係

$A_d = V_o / V_d$ は理想的には無限大
実際は100dBくらい→って 10^5 倍、、、すごい

実際の素子はもちろんこんなに理想的には動きません。出力電圧は±Vcc(電源電圧)より大きくなるわけないです。したがって、出力電圧は電源電圧で飽和してしまいます。また差動利得も本当は無限大ではなく、100dBくらいです。でもこれは10の5乗倍なので、結構すごい利得であることがわかります。

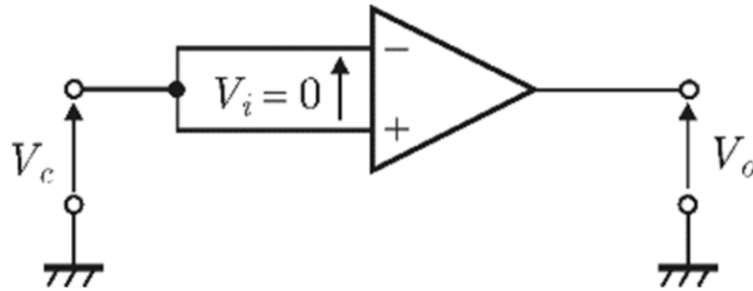
オフセット調整



オペアンプは増幅度が余りにも大きいため、2つの入力の電位差を0にしても出力が生じてしまう。これをオフセット電圧と呼ぶ。実際のオペアンプにはこの調節機能がある

現実的な話をもう一つしておく、オペアンプはあまりに強力な利得を持つため、2つの入力の電位差を0にしても出力が0になりません。ちょっとした差が増幅されてしまいます。このため、オペアンプは両方の入力に適切な電圧を掛けてやって出力を0に調整します。これをオフセット調整と呼びます。図はオフセット調整用の端子を持っているオペアンプを示しています。今回の授業では、オフセット調整は既に行われているものと考えます。

同相利得とは？

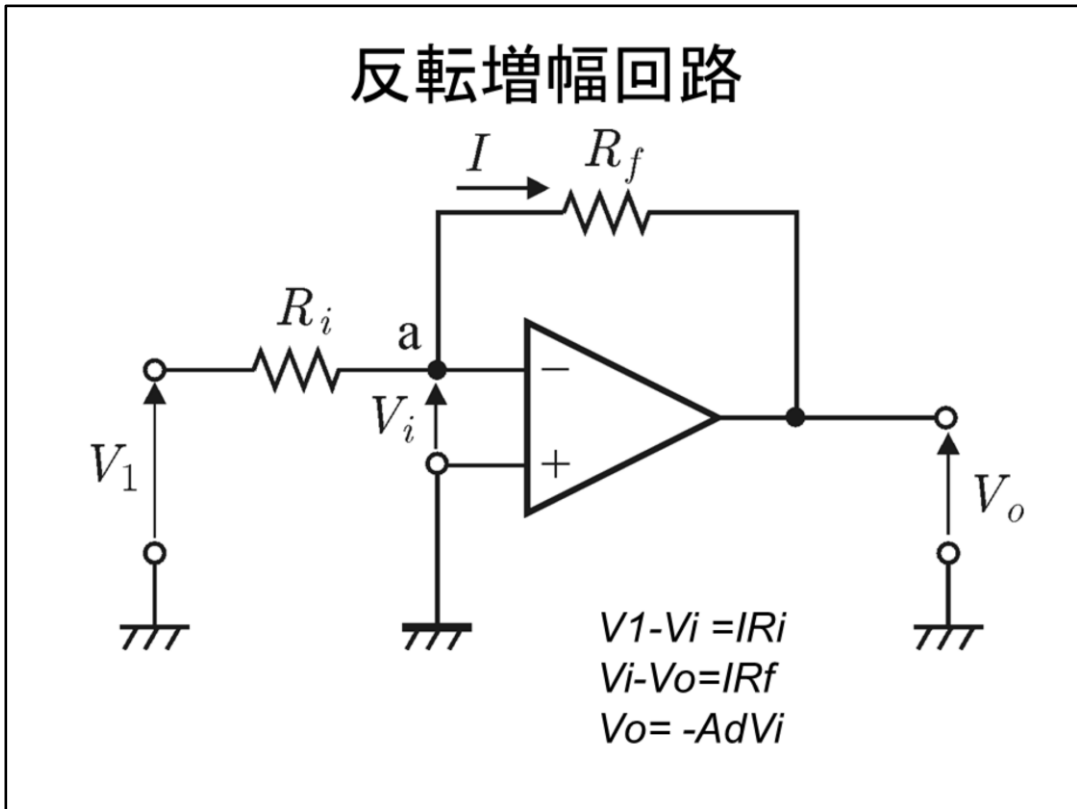


$A_c = V_o / V_c$
理想的には0

同相除去比 (CMRR: Common Mode Reduction Ratio) = A_d / A_c = 理想は無限大

ではオペアンプの両方の入力をくっつけて電圧を与えて見ます。オフセット調節が行われていれば、 V_c が0Vならば V_o も0Vになるはずですが、さて、 V_c にある程度の電圧を与えた場合、 V_o はどうなるでしょう？理想的には V_o は0のままになるはずですが、なぜならオペアンプは二つの入力の差のみを増幅するので、この両方が同じ電位ならば V_o は0のままのはずです。 V_o / V_c を同相利得と呼び、差動利得 A_d を同相利得 A_c で割った値を同相除去比CMRRと呼びます。オペアンプでは理想的にはこの値は無限大になり、実際に非常に大きな値になります。

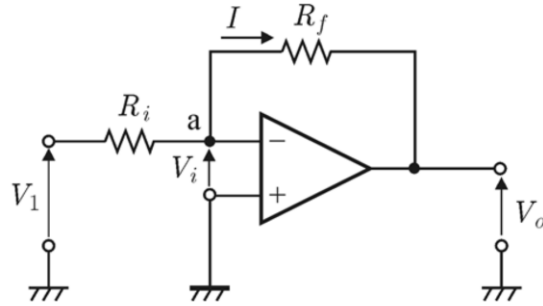
反転増幅回路



さて、オペアンプで最も基本的な増幅回路である反転増幅回路を紹介しましょう。この増幅回路は出力を負帰還抵抗 R_f を使って入力に戻すことによって、安定した増幅ができるようにしています。+側の入力はグランドに落とし、入力 V_1 は R_i を介して一側の入力に接続します。さて、ここで、オペアンプの入カインピーダンスは無限大です。したがって電流はオペアンプの中には流れ込まず、 R_i

R_f の抵抗の直列接続に流れます。今、 I の方向は入力側から出力側としました。当然 $V_1 - V_i = IR_i$ が成り立ちます。同じ電流 I は R_f にも流れるので $V_i - V_o = IR_f$ です。また、オペアンプの差動利得を Ad とすると $V_o = -AdV_i$ です。

反転増幅回路



$$V_1 - V_i = IR_i$$

$$V_i - V_o = IR_f$$

$V_o = -AdV_i$ 上の式から I を消去 V_o について解くと

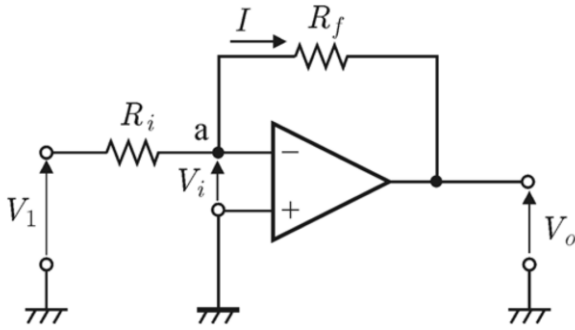
$$V_o = -\frac{R_f}{R_i}V_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)V_i \quad \text{ここで } V_i = -\frac{V_o}{Ad}$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i}V_1 - \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)\frac{V_o}{Ad} \quad Ad \text{ が } \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)V_o \text{ より大きければ}$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i}V_1$$

さて、この式から I を消去して、 V_o について解くと、上の図の式になります。ここで $V_i = -V_o/Ad$ です。 Ad が十分大きければ二つ目の項は無視できるくらい小さくなります。実際オペアンプの利得は無限大とはいかないまでも非常に大きいので、この項は無視していいです。すなわち、この反転増幅器の利得(電圧増幅率)は、 $-R_f/R_i$ となり、抵抗の比で決まります。

驚異のイマジナリーショート(バーチャル)ショート



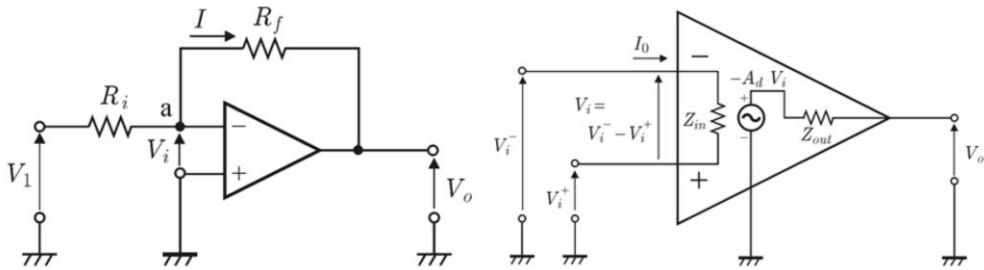
$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_1$$

この式は皆、丸暗記するが実はとてつもなく変なことが起きている。。。

VoがRfとRiの比で決まる→a点のレベルが0に固定されている
 Voが現実的な値の場合、Viは限りなく0に近い
 → a点はほとんどGNDと等しい しかしオペアンプの2つの入力間のインピーダンスは無限大
 電流は流れないのにショートしている→イマジナリーショート
 負帰還増幅器の入カインピーダンスはRiとなる

$V_o = -R_f/R_i \times V_1$ という式は多くの方は丸暗記してしまいがちですが、この式に従うととてつもなく変なことが起きていることが分かります。 $V_i - V_o = IR_f$ という式に $V_o = -R_f/R_i \times V_1$ を代入すると、 $V_i + R_f/R_i \times V_1 = IR_f$ となります。この式が $V_1 - V_i = IR_i$ と両立するのは、 V_i が0の時だ、という結論がでてしまいます。つまりa点は0Vで、オペアンプは差動入力に両方共0なのに増幅していることとなります。これはオペアンプの両方の入力間のインピーダンスが無限大、利得も無限大と考えたところから出ています。オペアンプに負帰還が掛かった場合は、入力間の電圧値が同じになります。電圧差がちょっとでもあったら無限大に増幅されて負帰還が掛かって同じ電圧に調節されてしまうためです。電流は流れないのに電圧は同じになり、ショートしているのと同じになること、これをイマジナリーショート(バーチャルショート)と呼びます。反転増幅回路は入力抵抗 R_i を介してグラウンドにイマジナリーショートしているため、入力インピーダンスは R_i になります。

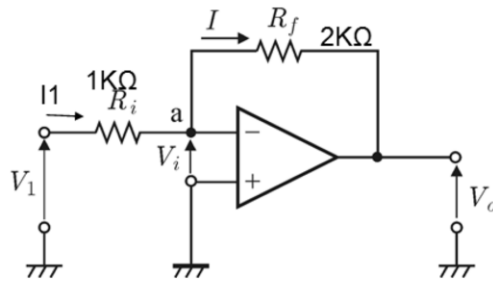
出力側の謎？



R_f を流れる I はどこに行くのだろう→オペアンプの中
 Z_{out} は0なので、オペアンプの出力は電圧源と考えて良い。したがって電流は必要に応じていくらでも取り出せるし電圧降下はしない

さて、出力側に目を転じてみましょう。 R_f を流れる電流はどこに行くのでしょうか？これはもちろんオペアンプの中と考えていいです。オペアンプの出力は電圧源と考えて良いので、電流は必要に応じていくらでも取り出せるし、電圧降下はしないと考えられます。したがって、 V_o は外部にどのような負荷が繋がろうと $-R_f/R_i \times V_i$ を維持します。

演習4-1

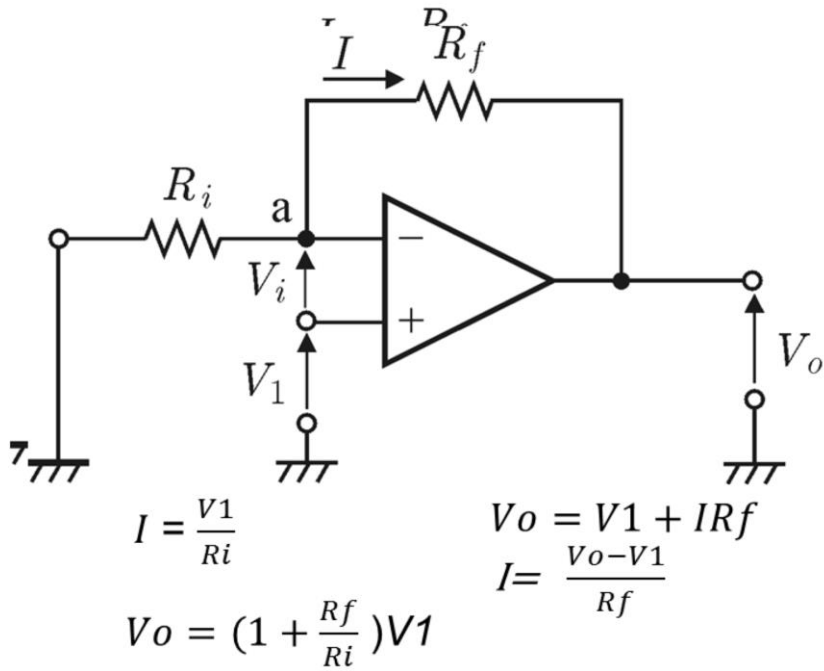


$V_1=1V$ のとき

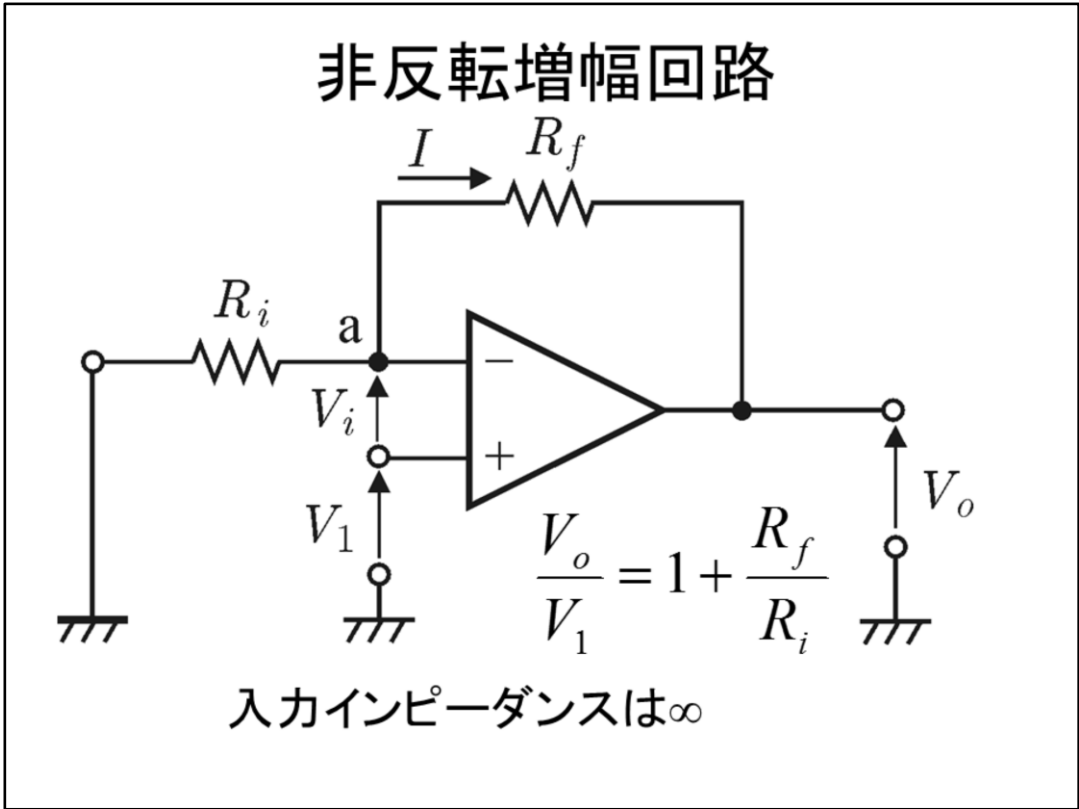
1. a点の電位を求めよ
2. I の値を求めよ
3. V_o の値を求めよ
4. 差動利得は何倍か

V_1 を1Vと考えます。それぞれ示した項目を求めましょう。イマジナリーショートを使えば簡単に解けます。

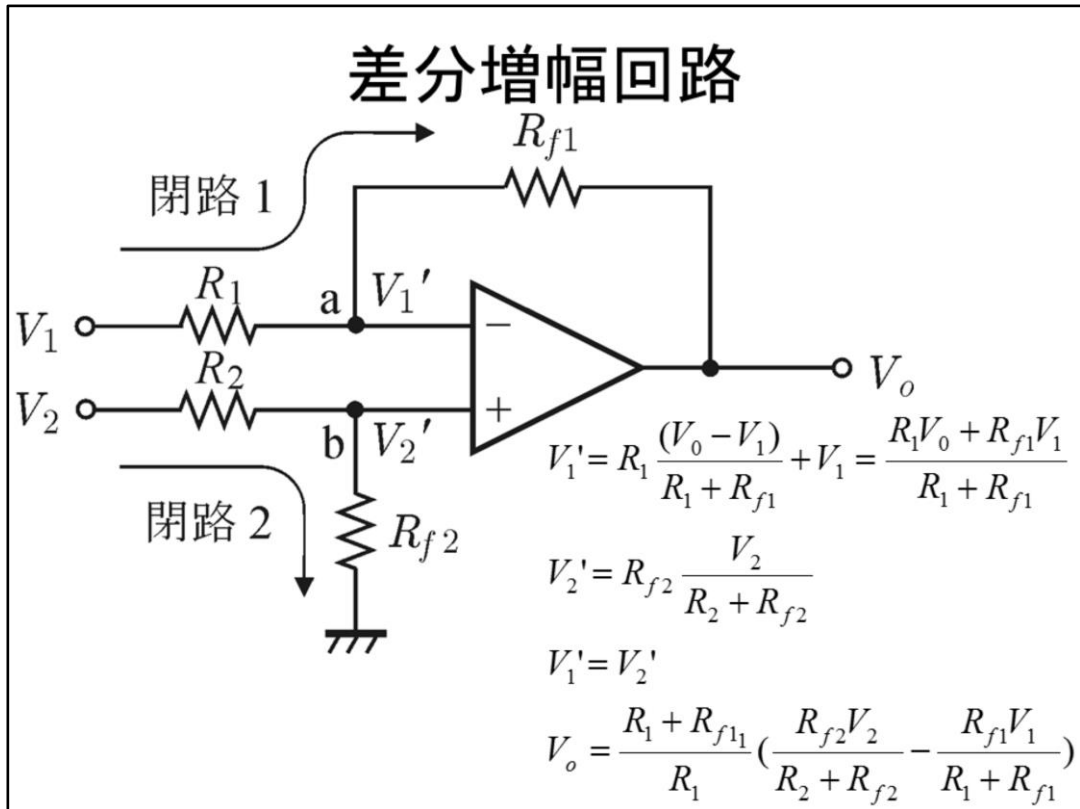
非反転増幅回路



では次は非反転増幅器について考えましょう。今度は一側を R_i を介してグランドに落とし、入力 V_1 はグランドと+側に与えます反転増幅回路と同じくフィードバックは R_f を介して掛かっているので、この回路もイマジナリーショート考え方が使えます。つまりa点は V_1 になります。したがって $I = V_1/R_i$ となります。 $V_o = V_1 + IR_f$ なので、 $V_o = (1 + R_f/R_i) \times V_1$ となります。この増幅回路は入力と出力の位相が同じであることから非反転増幅器と呼ばれます。

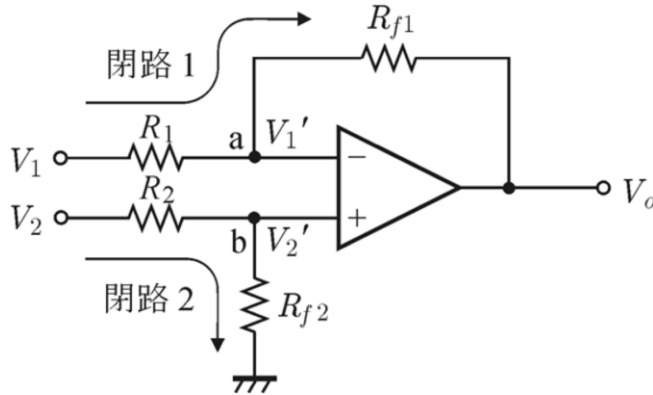


非反転増幅器の利点は入力直接オペアンプの入力に入っているため、入力インピーダンスが極めて高いことです。このため、非反転増幅器はどのような信号源からの信号も効率良く増幅することができます。



さて、オペアンプの基本は差分増幅回路ですので、当然、差分増幅は可能です。図の回路に V_1 、 V_2 の二つの信号を与えたとしましょう。閉路1に流れる電流によりa点の電圧 V_1' を求めることができます。閉路2も同様にb点の電圧 V_2' を求めることができます。ここでイマジナリーショートにより $V_1' = V_2'$ になります。これを解くことにより V_o を求めることができます。

差分増幅回路



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

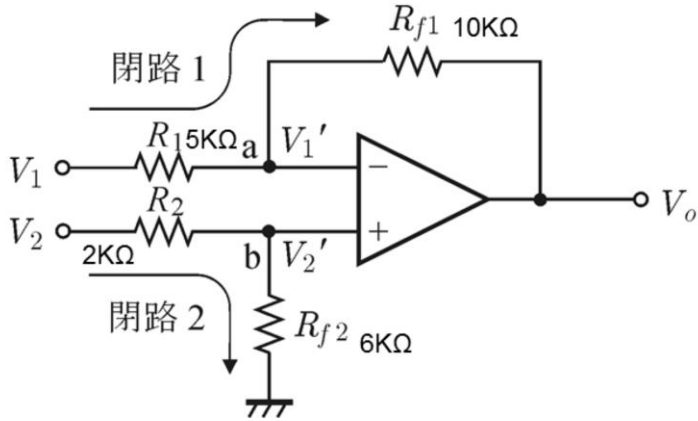
$R_1 = R_2 = R_i$, $R_{f1} = R_{f2} = R_f$ ならば

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

これは引き算器としても使える→次週

この式はちょっと複雑ですが、両側に使った抵抗が同じ、つまり $R_1 = R_2 = R_i$ 、 $R_{f1} = R_{f2} = R_f$ の場合は簡単になって $V_o = R_f/R_i(V_2 - V_1)$ が求められます。すなわち両方の入力に与える信号の差が、利得 R_f/R_i で増幅されていることがわかります。

演習4-2



V₁=2V、V₂=4Vの時、V_oの値はどうか？

式なんか使わなくてもイマジナリーショートで解決だ！

では次の演習をやってみましょう。この演習は式に代入してもいいですが、イマジナリーショートを使えばもっと簡単に求められます。

今日のポイント

負帰還が掛かっていればイマジナリーショートによりオペアンプの2つの入力の電圧は同じになる

反転増幅回路の増幅率

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_1$$

非反転増幅回路の増幅率

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_1$$



インフォ丸がまとめた今日のポイントはこの3つです。