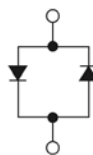


初心者のためのOPアンプ / ディスクリート部品組み 合わせ回路

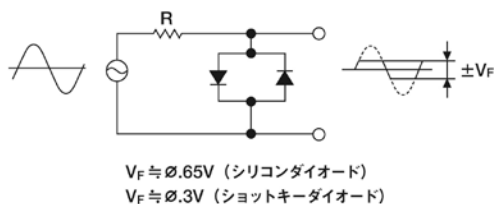
著者：藤森 弘己

1. 電圧をクリップして回路を保護するダイオード回路

OPアンプの周辺回路をみていると、時々図1のようなダイオードを互い違いに接続した回路ブロックを見ることがあります。よく見る場所としてはOPアンプの入力部分や、時には出力部分、分離されたグランドプレーンの間などがあげられます。この回路自身の機能は単純で、図2に示す通りです。この回路の両端に信号を加えると、振幅がダイオードの順方向電圧 V_F を超えると導通をはじめ、それ以上の電圧振幅では短絡状態になります。流れる電流は電圧と R により制限されますが、このダイオード回路の両端の電圧は、ちょうど $\pm V_F$ の電圧以上の部分を切り取ったように見えます。この動作をクリップあるいはクランプと呼びます。このクランプ電圧は、温度や電流、使うダイオードの種類により異なりますが、 25°C のとき一般的なシリコンダイオードで約 0.65V 、ショットキーダイオードやゲルマニウムダイオード(旧いですが)では約 0.3V です。もちろんダイオードの構造や流す電流にも影響されますので、細かい値はそれぞれのダイオードの特性表を参考にしてください。機能としては非常にわかりやすいダイオード回路ですが、この回路がOPアンプなどのアナログ回路に組み込まれて、どのような働きをするのかを以下に解説します。

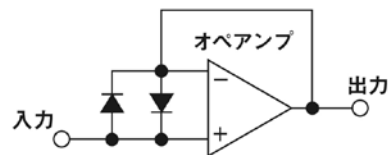


(図1. ダイオードクリップ回路)



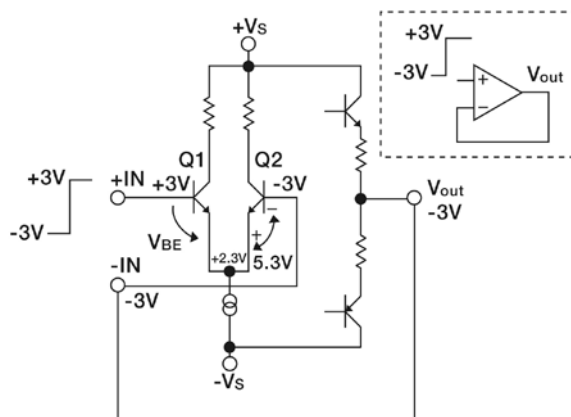
(図2. ダイオードによる信号のクリップ)

このダイオード回路をしばしば見かけるのは、図3の例のようなOPアンプの入力部分です。ここではユニティゲイン (ゲイン 1 倍) のバッファアンプ構成OPアンプの二つの入力 (反転、非反転入力) 間に、このダイオード回路が接続されています。OPアンプ回路を勉強した方ならご存知ですが、OPアンプは正常に動作しているときは、二つの入力電圧が等しくなります。(仮想ショート) したがってこのアンプ回路が正常に動作していれば、ダイオードには電圧はかからずどちらも導通しないので、このダイオードは切り離されてないものとみなせます。正常動作時にはないものとみなせる、一見無駄そうに見えるこの回路は、どんな時に活躍するのでしょうか。それはこの仮想ショートが一瞬崩れるときに起こります。



(図3. オペアンプ入力のクリップ回路)

図4に一般的なバイポーラトランジスタ入力のOPアンプの入力回路の簡略図と、そのユニティゲイン回路にステップ入力 (この例では -3V から $+3\text{V}$) が入った場合の内部動作を示します。

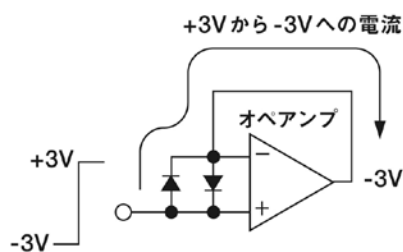


(図4. ステップ信号の入力)

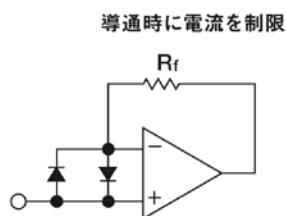
この時、いかに高速のOPアンプといえど、入力から出力へ信号が伝わるまでにはいくらかの時間がかかります。その間は図のように+入力には $+3\text{V}$ 、-入力には -3V かかっていることとなります。これが仮想ショートが崩れる瞬間です。この電圧関係を入力差分トランジスタの部分で見ると、Q1のエミッタ電圧は $+3\text{V}$ (ベース電圧) - Q1の V_{BE} (約 0.7V) = 2.3V となり、Q2のベースとの間に約 5.3V の逆方向の電圧がかかることとなります。小信号用トランジスタのベース・エミッタ間の耐圧 (ブレイクダウン電圧: BVE_{BO}) は数ボルトですので、このジャンクションで

短い間ですがブレイクダウンが起こることになります。この一回の過電圧でデバイスが即破壊するということはないでしょうが、ストレスとなり、信頼性に大きな影響を与えるので、これを避ける方法を講じる必要があります。

アンプの二つの入力間に先ほどのダイオード回路を接続すれば、入力電圧(差動入力電圧)は、少なくとも $\pm V_F$ を超えることはありません。これで入力トランジスタのブレイクダウンは防げそうですが、一つ小さな問題があります。図5のように接続すると、差電圧が生じた時、ダイオードに流れる電流を抑制する抵抗がないこととなります。信号源やアンプの出力に電流制限保護が入っていれば大丈夫ですが、念を入れるのであれば、図6のように流れる電流を制限する抵抗を入れます。

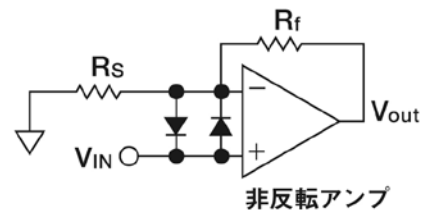
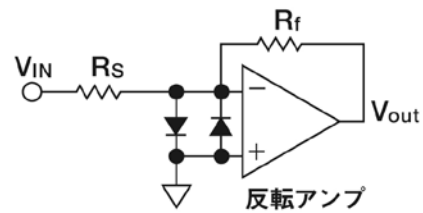


(図5. 回路に流れる電流)



(図6. 短絡電流の制限)

図7のようにユニティゲイン・バッファアンプだけでなく、反転アンプや非反転アンプにもこの方法は有効です。

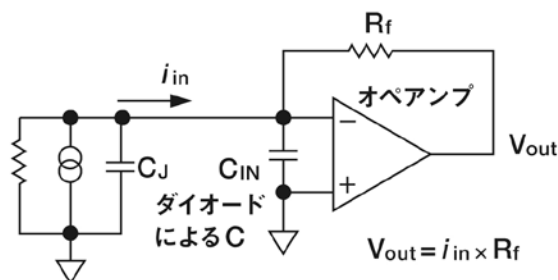


(図7. フィードバック抵抗による電流制限)

ダイオード素子自身は、スイッチング用のシリコンダイオードやショットキーダイオードが使用できます。大電流用のダイオードは必要ありません。OPアンプの中には、これらのクランプ・ダイオードを内蔵しているものも多くあります。内部等価回路があれば一目瞭然ですが、スペックシートの中の項目で、入力差動電圧が最大 $\pm 0.7V$ などと規定されているものは、この回路が内蔵されていると考えて間違いありません。高速パルスやステップ信号が入力される回路設計では注意してください。

このダイオード回路を付けると入力の保護になるのですが、よいことばかりではありません。ダイオードは接合部分で容量(キャパシタンス)をもち、その大きさは両端にかかる電圧や温度などで変化します。そのため電圧により変化する容量で信号が変調され、歪みが生じます。この接合部の容量は、一般的な小信号用ダイオードで $1pF$ 以下～数 pF ぐらいです。また逆バイアスの時、ダイオードに流れる漏れ電流(逆バイアス時のリーク電流)が存在し、アプリケーションによってはその大きさが問題になります。このリークも温度によって大きく変化するので注意してください。二つの入力に電位差がなければこのダイオードはないものとみなせると先に書きましたが、実はこの容量とリーク電流は、使う回路によっては大きく見えてきます。

OPアンプの二入力間に容量成分がつけば、アンプの位相特性が変わり位相余裕がなくなってくることはよく知られています。特に高速アンプではこの影響が顕著に表れ、時に発振器ということになります。補償の方法はありますが、回路設計は面倒になります。入力間容量が特に大きな問題になるのは、図8の電流/電圧変換アンプ(TIA: トランス・インピーダンス・アンプ)の場合です。

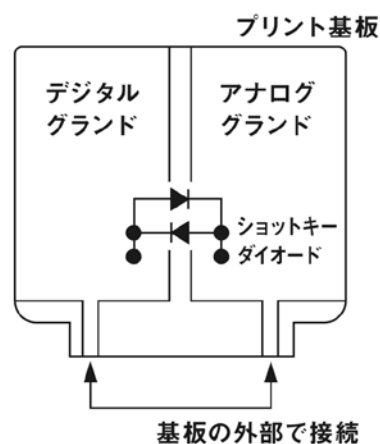


(図8. 電流・電圧変換アンプ)

詳しい説明は省きますが、入力に容量成分が付くと回路のノイズゲイン（シグナルゲインと必ずペアで現れます）が高い周波数で大きく変わり、結果として不安定動作を招くことになります。もちろんこれにも補償方法がありますが、高速アンプと同じように少し面倒です。またダイオードにリーク電流が流れるので、これが信号電流の計測に誤差（ノイズ）として加わります。ほぼゼロバイアスなので、ダイオード自身のショットノイズは無視することができます。

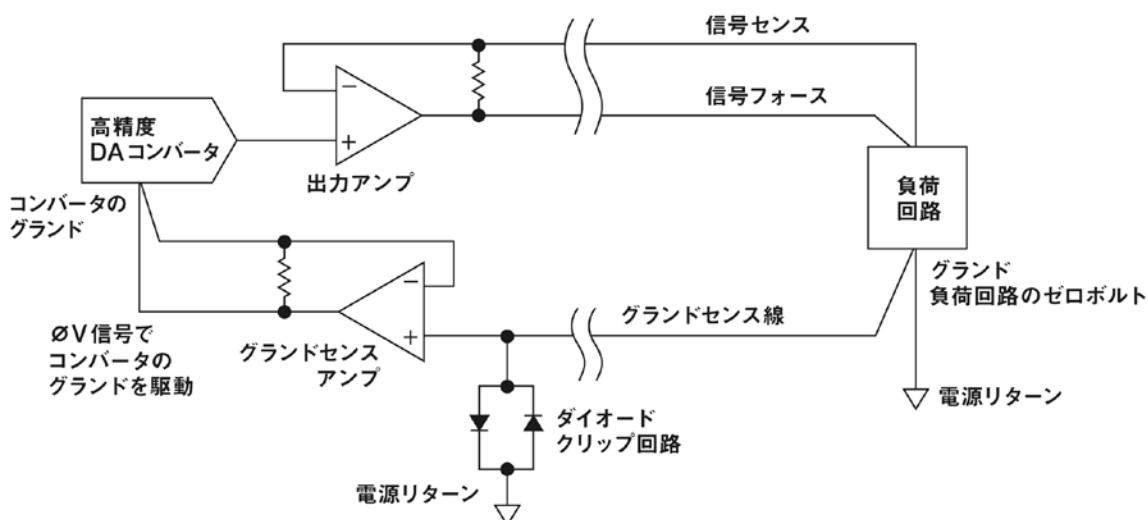
このダイオード回路は、二つの地点の電位を $\pm V_F$ 以上引き離されないような動作をします。これを利用して図9のように、基板上で分離された二つのグラウンドプレーン、例えばアナロググラウンドとデジタルグラウンドの電位がある電圧以上離れないように

する保護回路に使われます。基板が何枚も入るシステムでは、アナロググラウンドとデジタルグラウンドがひとつの基板上で接続されていないことがあります。そこで図のようにこのダイオード回路を二つのグラウンドリターン間に挿入し、 $\pm V_F$ 以上電圧が離れないようにクランプします。ここには扱える電流が比較的大きい、整流用のダイオードを使用します。



(図9. グラウンドのクランプ回路)

もう一つの特異な応用例として、グラウンドセンスアンプの入力電圧クランプを、図10に紹介します。



(図10. グラウンドセンス・アンプ)

グラウンドセンスとは、高精度の計測のため負荷側グラウンドレベルをゼロボルトの信号として精密に扱う技術です。図の DA コンバータは、高精度の電圧を負荷に供給するため出力バッファアンプを使い、信号をセンスとフォースに分けて送信しています。センス線には電流がほとんど流れない（バイアス電流だけ）ので、この配線による電圧降下はほとんどありません。そのためフォース線とつないだ点の電圧は、フォース線の配線抵抗にかかわらず、アンプの入力すなわち DA コンバータ出力電圧と等しくなります。アンプの二つ入力は、同電位になるという動作を利用しています。センスとフォース間に入っている抵抗は、二つの線がコネクタ接続などでオープンになった場合に、アンプが振り切れないようにするために入っています。このセンスとフォースの考え方をグラウンドも応用したものが、グラウンドセンスです。グラウンドセンス線は、DA コンバータの信号供給相手のグラウンドの電圧をアンプで受け、その電圧で信号源の DA コンバータのグラウンドを駆

動します。これは負荷側のグラウンドの信号レベルを、DA コンバータの 0V 信号として使うことになります。グラウンドセンス線には、電流がほとんど流れませんので配線抵抗の影響がなく、正確な 0V を DA コンバータに送ることができ、これにより正確な電圧を負荷に供給することができます。このセンス線入力のコネクタなどでオープンになるとやはりアンプが振り切れてしまうので、ダイオードの接続で $\pm V_F$ 以上自身のグラウンド電位より離れないようにします。多くの場合ショットキーダイオードにより $\pm 0.3V$ 以上離れないようにしています。

以上のように、今回のダイオード回路は、通常動作の際にはオフの状態、何か異常事態が起きた時に OP アンプやそのほかの回路を保護する機能を持っています。また良いことだけでなく、付けたことによる影響もありますので、適材適所を使用してください。