

アナログフィルタの基礎の基礎

by nabe(nabe2(at)abk.nu)

アナログ回路というと難しいというイメージがありますが、その基本的な法則というのはそこまで難しいものではありません。

中学生レベルの知識から出発して、最後に簡単なローパスフィルタを設計することを目標に「ざっくり」解説してみたいと思います。

初歩の回路記号の解説は省略するので、適当な本やサイトを参照してください。

■オームの法則■

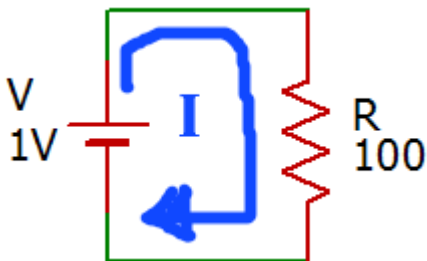
オームの法則は電圧と電流の関係を示すもっとも基本的なものです。

$$\text{電圧} = \text{電流} \times \text{抵抗値}$$

電圧は V、電流は I、抵抗は R と書くので、この式は次のようになります。

$$V = IR$$

これを回路図で示したのが次です。

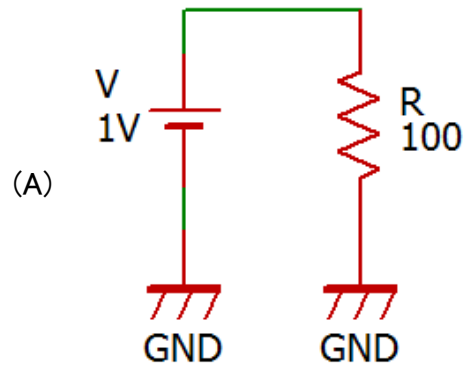


図は 1V の電圧が 100Ω の抵抗にかかっている様子を示しています。I=V/R ですので、 $1V/100\Omega = 0.01A$ の電流が流れている計算になります。回路の計算練習なら A(アンペア)のままで良いのですが、実用上は A という単位は大きすぎます。普通は補助単位 m(ミリ)を使用して 0.01A ではなく 10mA と書きます。

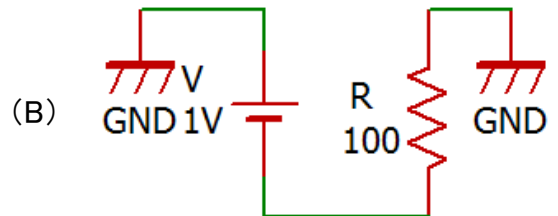
■電圧の捉え方■

オームの法則から回路を学ぼうとするとき、最初につまずくのは GND(グランド)の捉え方です。

先ほどの回路を GND を使って書き直してみましよう。



GND 同士は接続されているとみなされるので、この回路は先ほどの回路と全く同じものです。では、こうしたらどうでしょう。

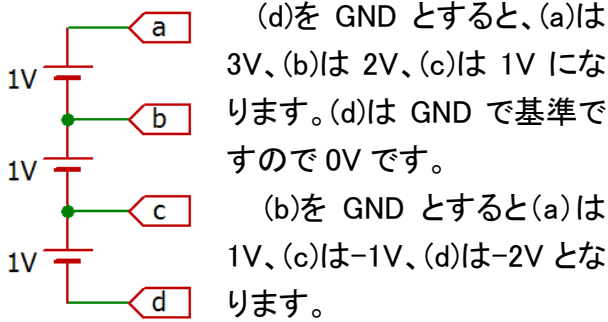


作成される回路は一緒です。普通(A)のように書きますが、(B)のように書きません。電源が1つならば低い方を基準にします。

GND とは 0V 地点であり基準です。

この意味を理解するために電源が複数ある場合を考えます。次の図は電池が3つ直列に並んでいる回路図です。

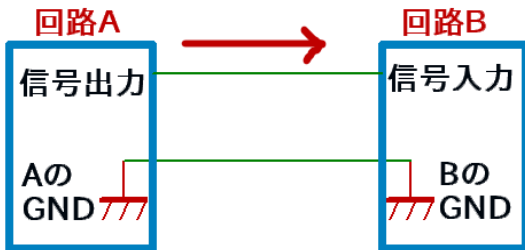
アナログフィルタの基礎の基礎



回路上意味がないのにどうして GND という基準を決めるのでしょうか。

話は変わりますが、あなたはどこに住んでいますか。平野部？ 海岸線？ 山間部？ 今居る場所の標高がどれくらいか分かりますか。その場所の高さを示す標高は、海拔とも言います。海拔とは海水面の高さを基準としたその場所の高さです。高さというのは相対的なものなので、基準をどこかに決めないと富士山もエベレストも高さを比べることができません。もし東京タワーやピラミッドといった建造物の高さを比べたければ、海面ではなく「その場所の地面」を基準にし、絵に並べるなら地面(基準)を揃えるのが普通です。

電圧も高さと同じように相対的なものです。基準をどこかに決めないと、回路と回路を接続することができません。CD プレイヤーとアンプ繋ぐことができるのは、GND という基準があり、GND という基準に対してどのような信号をやりとりするか決まっているからなのです。



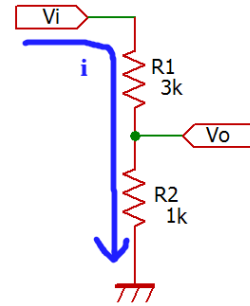
ですから、信号をやり取りするときは最低2

本以上接続し、信号線と一緒に GND 同士を接続して基準を共通にするのです。

■分圧■

信号は普通電圧で表現されます。単に信号と言ったときは電圧だと思ってください。

次図は入力電圧 V_i を分圧し、より低い電圧 V_o を出力する回路です。



回路では V_i という電圧信号が与えられ、 V_o という電圧信号を取り出しています。なお GND を共通にするという約束の下、入出力共に GND 接続を省略しています。おかげで回路表記が簡素になり、見やすくなりました。

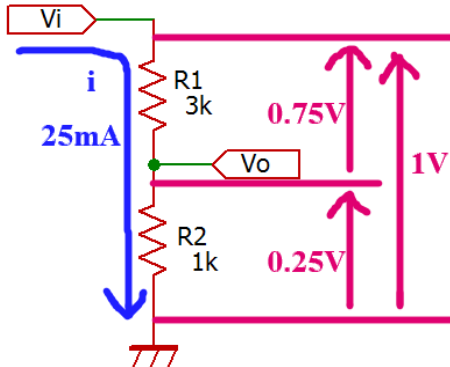
電圧 V_i により R_1 と R_2 に電流が流れます(電圧差がある 2 地点が接続されていれば通常電流が流れます)。今回のように、直列接続のときは R_1+R_2 の抵抗が接続されていると見なせます。

コラム1 ~補助単位一覧~

補助単位	係数	倍率
M (メガ)	10^6	1,000,000
k (キロ)	10^3	1,000
m (ミリ)	10^{-3}	0.001
u (マイクロ)	10^{-6}	0.000001
n (ナノ)	10^{-9}	0.000000001
p (ピコ)	10^{-12}	0.000000000001

アナログフィルタの基礎の基礎

よって V_i を 1V とすればオームの法則から $1V/(1k+3k)=25mA$ の電流 i が流れます。同じくオームの法則から $V=IR$ であるので、 R_1 に $25mA \cdot 3k=0.75V$ 、 R_2 に $25mA \cdot 1k=0.25V$ の電圧がかかります。電圧比と抵抗比が一緒になっていることを注意してください。



全体の電圧 1V を R_1 と R_2 でそれぞれ分け合うので分圧といいます。 V_i が 1V のとき、 V_o は 0.25V になります。 V_i の 1/4 倍が V_o となり関係式で書くと次のようになります。

$$V_o = V_i/4$$

普通は抵抗分圧の一般式を示して終わるところですが、実のところ細かい式なんて覚えていませし、覚える必要もありません。

分圧の計算はまず電流を考えます。

$$i = V_i/(R_1+R_2)$$

得られた電流に求めたい部分の抵抗をかけます。

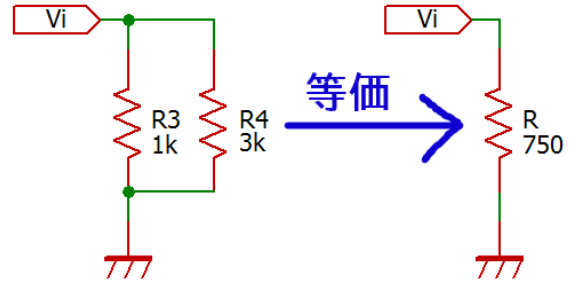
$$V_o = R_2/(R_1+R_2)$$

■ 並列な合成抵抗 ■

細かい式は覚えていないとは書きましたが、並列抵抗の合成抵抗値だけは覚えておいた方が良いでしょう。

合成抵抗(値)とは複数の抵抗の接続を「あたかも1つの抵抗である」と見なしたとき

の抵抗値のことです。合成抵抗を考えると複雑な回路も解析することができます。



R_3 と R_4 の並列抵抗値は $R_3//R_4$ と書き、次式で求めることができます。

$$R = (R_3 \cdot R_4)/(R_3+R_4)$$

代入すると、 $1k \cdot 3k/(1k+3k)=3k/4$ となり、 $0.75k\Omega$ になります。この式は「和(わ)ぶんの積(せき)」と覚えます。直列接続の場合は足すだけでしたが、並列だと多少ややこしいですね。

この式に色々な値を代入して計算すると、並列抵抗の特徴が見えてきます。

- 合成抵抗値は各抵抗値より小さくなる。
- 2つの抵抗値に差があるとき、小さい抵抗値の影響が支配的になる。
- 同じ抵抗値が2つ3つあるときは、合成抵抗値は 1/2、1/3 になる。

3つ以上の合成抵抗は3つのうち2つを合成し、合成した抵抗と残る1つを合成することで求められます。

コラム2 ～「和分の積」を求める～

並列合成抵抗も分圧と同じようにオームの法則から導けます。ぜひ挑戦してください。

【導き方】 R_3 と R_4 それぞれに流れる電流を求めて加算すると全体に流れる電流が分かります。電圧が決まり、電流が分かれば、オームの法則から(1つの抵抗と見なしたときの)抵抗値が分かります。

アナログフィルタの基礎の基礎

合成抵抗にはちょっとした応用があります。どうしても 91Ω の抵抗値が欲しいとき、 100Ω の抵抗に $1k\Omega$ の抵抗を並列につけると、合成抵抗が 90.9Ω となります。

また、この例からも分かるとおりの小さい抵抗値の影響が支配的なので、10 倍も違えば「小さいほうの抵抗値である」と見なしても多くの場合問題がなくなります。

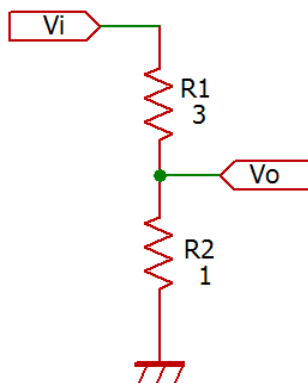
■ 出力抵抗と入力抵抗 ■

電源を言えば何を思い浮かべるでしょうか。私はもっぱら電池を使用しますが、AC アダプタや SW (スイッチング) 電源という人も多いでしょう。最近減りましたが SW 電源ではない AC アダプタ (トランス電源) が昔は主流でした (有名なのはファミコンの AC アダプタ)。

あるトランス式 AC アダプタには $12V500mA$ と書いてあります。これは $12V$ で $500mA$ まで電流が流せるという意味……ではありません。 $500mA$ 流したときに $12V$ の電圧になるよという意味です。 $100mA$ ぐらいしか流さなければ $14\sim 15V$ ぐらいの電圧が出ます。不良品でも何でもなくこれが普通のことでした。しかし、電源なのに電圧が変わってしまう。これはどういうことなのでしょうか。

右図は、先ほど分圧のところを示した回路図の抵抗値を $1/1000$ にしたものです。

この回路に $1.5V$ の単 3 マンガン電池を繋いでみましょう。分圧は $1/4$ です



から、 $1.5/4 = 0.375V = 375mV$ が出力されるはずですが。

しかし実際に計測すると不思議なことが起こります。



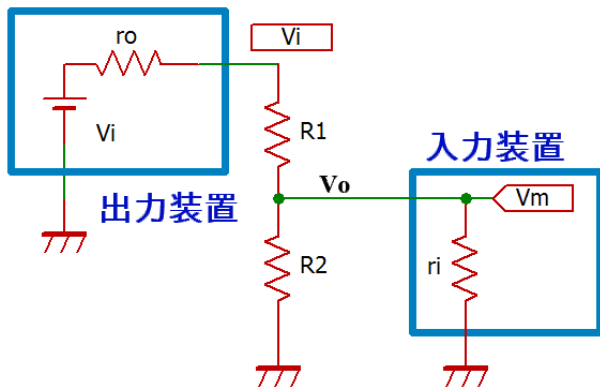
計算上、 $1.412/4.3 = 328mV$ となるべきものが $238mV$ しかないのです。一体、何が起きているのでしょうか。

オームの法則が正しくないのではありません。オームの法則は正しく成り立っています。この謎の正体は電池にあります。回路を接続したまま電池電圧を測ると $951mV$ と表示されました。 $238mV$ の 4 倍です (正確に 4.3 倍でないのは抵抗値誤差です)。電池から回路を切り離すと今度は $1.412V$ になります。

常に同じ電圧を出力する理想的な電源は世の中に存在しません。電源は必ず内部に抵抗を持ち、それを内部抵抗と言います。

内部抵抗を理解するために、電源を等価回路に置き換えます。等価回路とは理想的ではない素子を「実体に即して分かりやすく表した回路」のことです。

アナログフィルタの基礎の基礎



電源装置の等価回路は、理想的な電源と直列につながった出力抵抗 r_o で表されます。

マンガン電池の内部抵抗(出力抵抗)は数 Ω と言われますが、 $r_o=2\Omega$ 、 $R_1=3\Omega$ 、 $R_2=1\Omega$ とすれば、 $V_i=1.4 \cdot 4/6=0.93V$ となり測定結果に一致します。このように内部抵抗が大きいと、大きな電流が取り出せません。

SW 電源や直流安定化電源ならば内部抵抗はほぼ 0 と見なせますし、アルカリ電池の内部抵抗は 0.数 Ω と小さめで大きな電流が取り出せますが、一方で配線やコネクタ、電池バネ等が抵抗($\sim 1\Omega$)を持つことに注意してください。電力を消費する R_1 や R_2 から見れば、配線抵抗も内部抵抗に見えます。

コラム3 ～理想的な素子～

少し回路になじみがある人ならば「理想オペアンプ」という言葉を耳にしたことがあると思います。理想とは計算どおりということで、つまり通常のおペアンプは理想とは程遠いということです。抵抗もコンデンサもすべての素子は理想ではありません。もし、理想的なコンデンサやオペアンプが存在すれば、すべての回路はただ 1 種類の抵抗・コンデンサ(値別)とただ 1 つのおペアンプで足りてしまいます。

電源に限らず、一般に出力装置はすべて「出力抵抗」を持ちます。これは電源 V_i を信号源の 1 つと見ることで理解できます。実際、電源も出力装置の 1 つに過ぎません。

続いて入力抵抗について考えてみます。 V_o の先に電圧計など「何かしらの入力装置」が接続されているとして、等価回路に置き換えることができます。

例えば安いテスターなどではレンジによって入力抵抗が十分に高くないことがあります。 $V_i=1V$ 、 $r_o=0$ 、 $R_1=30k$ 、 $R_2=10k$ のとき、入力抵抗 $r_i=30k$ ならば、 $V_o(=V_m)$ と GND 間の抵抗値は $R_2//r_i=(30 \cdot 10)/(30+10)k=7.5k$ 。計測電圧は $V_m=7.5/(30+7.5)=0.2V$ (本来なら 0.25V) となります。

信号(電圧)を正しく伝えるためには、出力抵抗が接続先入力抵抗に対して十分に小さい必要があります。通常は 10 倍以上あれば問題ありませんが、高精度な測定をする場合は 100~1000 倍以上が必要になることもあります。例えばオシロスコープでは入力抵抗として 10M Ω か 1M Ω を使用するのが一般的です。

コラム4 ～出力抵抗を測る～

オームの法則を使って出力抵抗を測ることができます。

まず何も接続しないで電圧を測ります。これが内部抵抗を無視したときの電圧になります(入力抵抗が十分大きいと内部抵抗を無視できる)。次に 10 Ω の抵抗を接続して電圧 V を測ります。すると抵抗に流れる電流 i が分かり、同時に低下した電圧 V_b が計測され、ここから r_o にかかる電圧 $V_a=(V-V_b)$ が分かり、 i と V_a から r_o が求められます。

アナログフィルタの基礎の基礎

コラム5 ~オーディオと入力抵抗~

CDプレイヤーやDACなどは通常100~200Ω程度の出力抵抗を持っています(持ってない装置もあります)。1Ω以下の出力抵抗を持ったプレイヤーが少ないのはショートしたとき壊れないようにと、接続先にどんな機器がつながってもプレイヤーを正常に動作させるためです。

逆に接続先であるアンプなどの入力抵抗は10k~200k程度です。アンプの入力抵抗はこの付近の値にすることが暗黙の了解となっています。なぜオシロスコープのように1M以上の入力抵抗を持ったものが無いのでしょうか。それは入力抵抗が大きければ大きいほどノイズを拾いやすくなるからです。

■交流回路とコンデンサ■

フィルタといえばコンデンサとコイルですが、無線回路以外ではコイルはあまり使われないのでコンデンサに絞って解説します。

コンデンサ(キャパシタとも言う)の特徴は、周波数によって抵抗値(に相当するもの)がこころろ変化することです。

コンデンサCの抵抗値に相当するリアクタンス(単位Ω)は次式で求められます。

$$XC = 1/(2\pi fC)$$

「にーぱいえふしー分のいち」と覚えます。fは周波数です。

ちなみにコイルLのリアクタンスは

$$XL = 2\pi fL$$

です。リアクタンスはコンデンサとコイルの抵抗値に相当するもので、単位は共にΩです。リアクタンスとレジスタンス(抵抗)を区別せず呼ぶときはインピーダンスと言います。

とりあえずコイルのことは忘れ、1μFコンデンサのインピーダンスを求めてみましょう。

$$XC = 1/(2\pi f \cdot 1 \cdot 10^{-6})$$

周波数fがあるので、それぞれ周波数別にインピーダンスを求めてみます。式から周波数に反比例することはすぐに分かります。

周波数	式	XC
10Hz	$1/(2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6})$	16kΩ
50Hz	$1/(2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-6})$	3kΩ
100Hz	$1/(2\pi \cdot 100 \cdot 10^{-6})$	1.6kΩ
1kHz	$1/(2\pi \cdot 1000 \cdot 10^{-6})$	160Ω
10kHz	$1/(2\pi \cdot 10000 \cdot 10^{-6})$	16Ω

関数電卓等がある人は実際に計算してみてください(この手の計算するとき関数電卓やポケコンは必須アイテムです)。電卓がなければ単純に2πを6と置いて手計算+電卓でも出せるでしょう。

直流は0Hzと考えることができ、このときコンデンサのインピーダンスは無限大です。直流成分を流さないというコンデンサの大きな特徴はこの式からも見て取れます。

コラム6 ~コイルの話~

フィルタ回路はコイルでもコンデンサでも同じように作ることができますが、コンデンサに比べて「大きく」「高く」「精度を出しにくく」「ノイズが出る」ためもっぱらコンデンサが利用されます。よってコイルはコイルでないと困る場面でのみ使用されます。

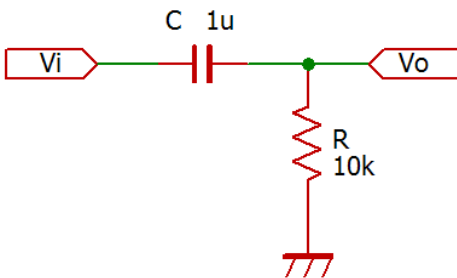
その1つが無線通信の受信回路です。コイルはコンデンサと相反する性質があり、ある周波数でインピーダンスが等しくなります。コイルとコンデンサを並べて接続した回路でインピーダンスが揃うと共振という現象が起こります。この共振する場所を調整することをチューニングと言います。ラジオから音が鳴るのはこの共振のおかげです。

アナログフィルタの基礎の基礎

■簡単なハイパスフィルタ■

やっとフィルタの話に到達できました。フィルタにはローパスフィルタとハイパスフィルタの2種類があります。ある周波数より低い信号(ロー)を通過させる(パス)フィルタがローパスフィルタ(LPF)で、ある周波数より高い信号(ハイ)を通過させる(パス)フィルタがハイパスフィルタ(HPF)です。

次の回路は HPF の例です。



この回路はずっと前に出た、抵抗の分圧と同じように考えることができます。

$$V_o = V_i \cdot 10k / (XC + R)$$

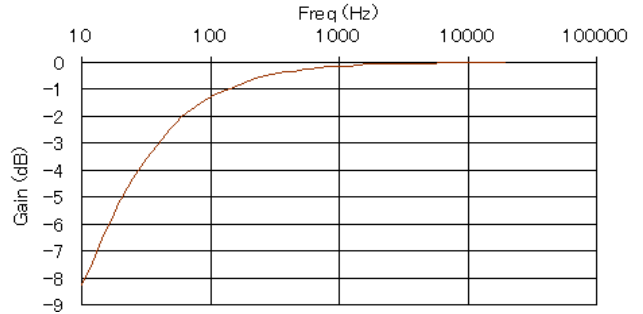
※この式は厳密には正しくありません。

ここから倍率 V_o/V_i を求めます。

周波数	XC	式	倍率
10Hz	16kΩ	$10k / (16k + 10k)$	0.38
50Hz	3kΩ	$10k / (3k + 10k)$	0.77
100Hz	1.6kΩ	$10k / (1.6k + 10k)$	0.86
1kHz	160Ω	$10k / (160 + 10k)$	0.98
10kHz	16Ω	$10k / (16 + 10k)$	0.998

この結果をグラフにしてみます。Excel 等で簡単に計算することができます。

1kHz 以上ではほとんどの信号を通しますが、100Hz 以下では減衰が大きいことが分かります。20Hz 付近で -6dB (1/2 倍の意味) となり、20Hz 付近で信号が約半分になっていることが分かります。



コラム7 ~正確なコンデンサの計算~

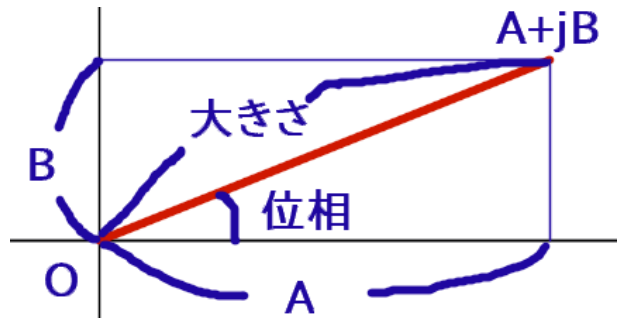
コンデンサを正確に計算するには、コンデンサのインピーダンスを $-jXC$ として計算する必要があります。 j は虚数単位です。回路においては電流 i と混同しないように j を使う約束になっています。よって LPF の式は、

$$\text{ゲイン } g = 10k / (-jXC + R)$$

となります。複素数は複素数のまま計算し、最後に有理化して

$$g = A + jB$$

の形にします。この複素数 g の大きさがゲイン、偏角が位相になります。

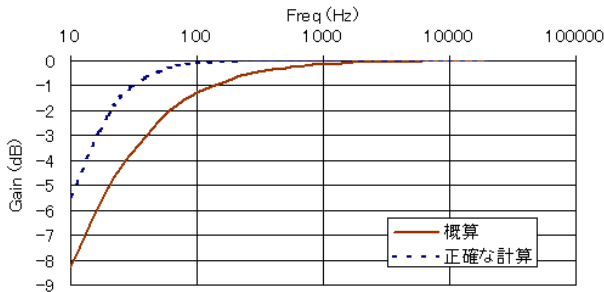


コイルの場合は jXL になります。この話を続けるとキリがないのでまたの機会に。工業高校向けの電気回路の教科書や参考書がとても分かりやすくお勧めです。

ちなみに数学の教養があれば、よりスマートに解説できますが、身の回りのエンジニアはみんな数学が苦手だったりする不思議です。

アナログフィルタの基礎の基礎

次に厳密な式に従って計算したグラフを示します。



この差を大きいと見るか小さいと見るかは人それぞれですが、この程度の誤差があることを知っていれば概算で大雑把な傾向をつかむことができます。

■ dB 表記の必要性 ■

回路において、倍率は dB(デシベル)で表記するという習慣があります。倍率 g を常用対数 \log_{10} により次式で変換します。

$$G = 20\log(g)$$

\log は感覚量とも言われ、地震のマグニチュード等にも使われています。音で言えば、電圧を倍にしても人間には「倍の大きさ」とは感じられず、対数表記の方が人間の感覚に近いと感じられます。

dB には利点があります。それは計算がしやすいということです。dB が対数であるため、積算の代わりに足し算で済むからです。

例えば次のような回路の全体のゲインがいくつか考えます。普通に考えれば



$$g = 10 \cdot 3 \cdot 16 = 480$$

となりますが、dB 計算ならば

$$G = 20 + 10 + 24 = 54\text{dB}$$

となります。これなら暗算でもできますね。

しかし dB では大きさがよく分からないという声もありそうです。これもコツを覚えれば簡単です。

dB 表記	倍率
6dB	2 倍
20dB	10 倍

この2つを覚えるだけです。

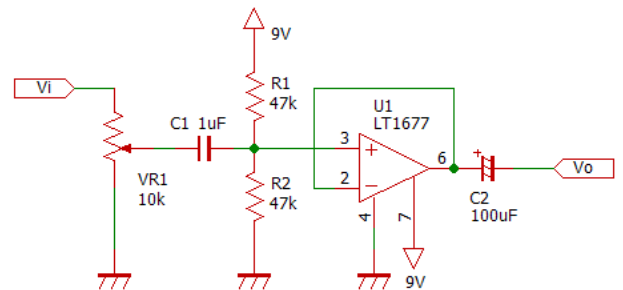
$$54\text{dB} = 20\text{dB} + 20\text{dB} + 20\text{dB} - 6\text{dB}$$

ですから、 $10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$ 倍より 2 倍少ない値となるので、約 500 倍とすぐに求められます。

■ フィルタ設計の実際 ■

最後にフィルタをどのように考えて設計するかという話をして終わりたいと思います。今までの応用編となっていますので、挑戦気分で読んで頂ければと思います。

カップリングコンデンサの検討



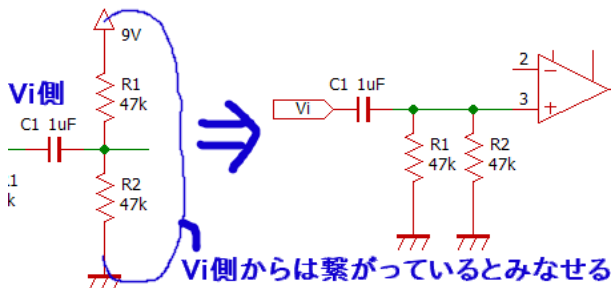
よくあるオペアンプ発のアンプ回路です。9V 電池 1 つでヘッドホンを接続し実際に動作させることができます。U1 と書かれた三角形がオペアンプの記号です。オペアンプの解説は他に譲りますが、この回路では+端子側の電圧がそのまま 6 と書かれた出力から出てきます。「・」の打たれてない場所は交差してい

アナログフィルタの基礎の基礎

でも接続されていません。回路図のルールですのでよく覚えておきましょう(ただし、うっかり打ち忘れた回路図もよく見かけます)。

C1、C2はカップリングコンデンサと言われます。DC(直流成分)を通さず音信号である交流信号だけを通過させるために使用されます。これらは低い周波数を通さず高い周波数を通過させるハイパスフィルタの一種です。C1、C2がないと出力や入力側に4V以上の直流が漏れ出してしまい問題があります。

入力側から見ていきます。信号の立場で考えるとき電源は0Ωの抵抗とみなし、プラスとマイナスは0Ωで繋がっていると考えます。よってR1とR2はVi側から見れば並列につながっています。これを踏まえて入力部分を等価回路に書き直します。



※補足: R1とR2はバイアス回路と呼ばれます。オペアンプは電源電圧である0V~9Vより小さい範囲の信号しか出力できないため、-2V~2Vぐらいある音声信号を増幅することができません。

R1とR2の真ん中の点は $9/2=4.5V$ であり、カップリングコン C1によって直流的な下駄を履かせています。これにより、-2V~2Vの信号は、カップリングコンデンサ C1を経て2.5V~6.5Vの信号となりオペアンプ電源電圧範囲内に入ります。

R1とR2の並列合成抵抗値を求めます。同じ抵抗値の並列なので半分の $23.5k\Omega$ です。よって1uFのコンデンサのうしろに $23.5k$ の抵抗が1つ繋がっていると見なせます。

一番高いポイント(今回は1倍なので0dB)から-3dB($1/\sqrt{2}$)下がるポイントをカットオフ周波数と言います。これを実際に求めてみましょう。コンデンサのインピーダンス

$$XC = 1/(2\pi fC)$$

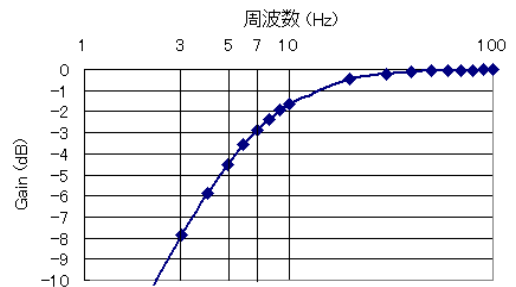
が、抵抗値 $23.5k\Omega$ と等しくなるポイントが-3dB下がるポイントです。

$$23.5k = 1/(2\pi f \cdot 1\mu)$$

$$f = 1/(2\pi \cdot 1\mu \cdot 23.5k)$$

$$= 1/(2\pi \cdot 23.5 \cdot 10^{-3}) = 6.77Hz$$

6.7Hz付近が実際どのようなカーブになっているのかグラフを見てみましょう(厳密計算のグラフです)。



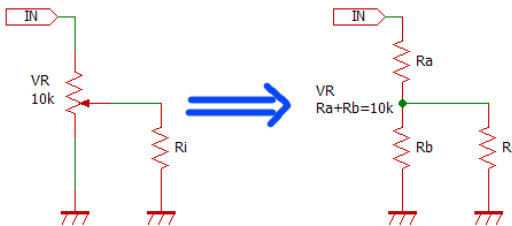
人間に聴こえる周波数は20Hz~20kHzであると言われ、HPFやLPFのカットオフポイントはこの外側に設定する必要があります。実際に20Hzの信号を完全に通過させたければカットオフのポイントを20Hzより低く設定することが望ましいです。例のように1/3のポイントだと、20Hzでほとんど減衰がありません。

※補足: 回路の特性を取ったとき、一番増幅率の高い点を0dBとして、低い方のカットオフ周波数~高い方のカットオフ周波数を帯域幅と言います。

アナログフィルタの基礎の基礎

入力部を設計したときの考え方を書いてみます。入力カップリングコンデンサに小さめのフィルムコンデンサを使いたいというのがまずあり、フィルムコンデンサでは 1uF 程度が限度ですので、そこからアンプ側の入力抵抗を決定しています。入力抵抗はノイズの面からできるだけ小さいほうが望ましく(かつ小さくても VR の倍程度)、カットオフポイントの様子を見ながら 20kΩ 前後になるように設定しました。

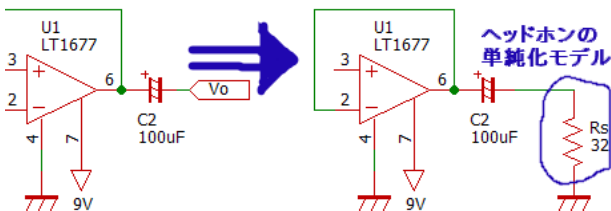
※補足: 入力抵抗はボリュームの抵抗値よりも倍以上入力抵抗を高くしておく必要があります。ボリュームは分圧比を変えることで信号の大きさを変えています。



Rb と Ri は並列ですので、Ri が例えば 1kΩ と小さければ Rb よりも Ri の値が支配的となります。するとボリュームのカーブが狂います。

別の見方をすると Ri から見れば Ra//Rb は信号 (IN) の出力抵抗であるので、ボリュームの出力抵抗より十分高くなければならないのです。

続いて出力カップリングコンデンサを見てみましょう。



出力側はヘッドホン接続と仮定しています。

ヘッドホンはよく 32Ω の抵抗をモデルとして使用しますが、この値はヘッドホンのインピーダンスに相当します。

試しに 32Ω でカットオフを計算すると

$$32 = 1/(2\pi f \cdot 100\mu)$$

$$f = 1/(2\pi \cdot 100\mu \cdot 32)$$

$$= 1/(2\pi \cdot 3200 \cdot 10^{-6}) = 49\text{Hz}$$

となり、50Hz 程度から減衰が始まるため 20~50Hz 程度の低音があまり出ないことが分かります。これは C2 が小さすぎるためで、470uF に増やしてみます。

$$f = 1/(2\pi \cdot 470\mu \cdot 32)$$

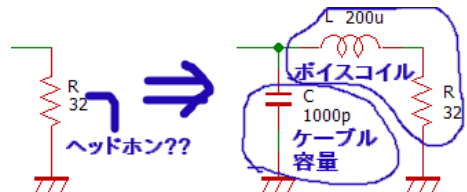
$$= 1/(2\pi \cdot 470 \cdot 32 \cdot 10^{-6}) = 10.58\text{Hz}$$

コンデンサの値を約 5 倍にしたので、通過周波数は約 1/5 になっています。カットオフ 10Hz 程度となり、満足な結果となりました。

ただし、ヘッドホンのインピーダンスは主なものでも 16Ω ~ 64Ω、他にも実に様々です。もし 16Ω で同じ通過周波数を得るにはコンデンサを倍にする必要があります。

コラム8 ~ヘッドホンのモデル~

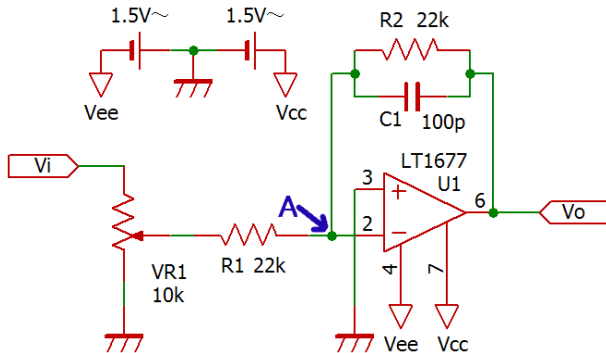
回路設計上、ヘッドホンやスピーカーは「公称インピーダンス」相当の抵抗でモデル化されることが多いようですが、あまり適切ではありません。ヘッドホンは簡易なモデルでもコイルやコンデンサの組み合わせとして表すこととなります(コンデンサは省いても問題はない)。



ヘッドホンやスピーカーは周波数によってインピーダンスが変化します。公称インピーダンスは、通常一番小さい周波数でのインピーダンスを示します。

アナログフィルタの基礎の基礎 ローパスフィルタコンデンサの検討

最後の回路はローパスフィルタ(LPF)を持つオペアンプ1発の低電圧アンプです。これも実際に動作します。



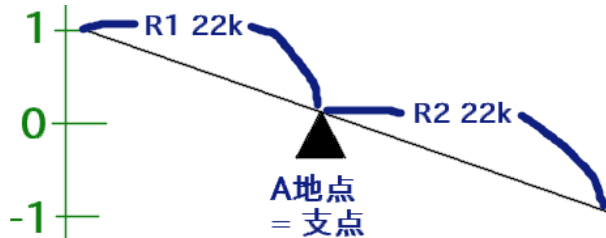
この回路はいわゆる反転アンプで、正負電源を使用したDC直結アンプにもなっています。DC直結アンプは、カップリングコンが無く、直流(DC)も増幅することからこのように呼ばれています。

この回路の増幅率 g は次式で導かれます。

$$g = -R2/R1$$

$R1=R2$ であるので、 -1 倍アンプです。マイナスというのが気になるかもしれませんが、要するに入力と同じ大きさの出力が出るアンプです。

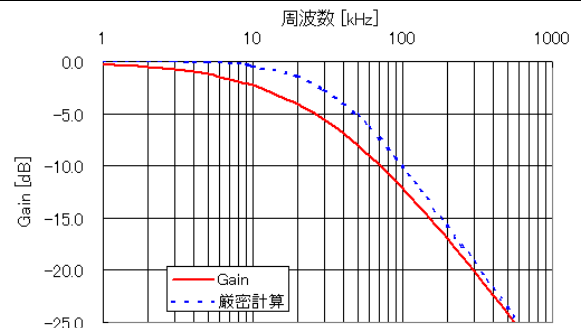
少々脱線しますが、A 地点の電圧は+端子の電圧(この回路では GND)と等しくなります。これはバーチャルショートと呼ばれる現象で、オペアンプの動作をイメージするのに役立ちます。



A 地点の電圧は常に 0 であるので、動かない支点と見なせます。R1 と R2 はシーソーを構成していて(オペアンプの性質から同じ電流が流れるためシーソーと見なせる)、ここから入力電圧と出力電圧のイメージが掴めます。R1 が 1k で R2 が 10k ならば何倍になるかすぐイメージできますね。

さて LPF として動作するのは、R2 と並列についているコンデンサ C1 の役割によります。C1 のインピーダンスは周波数によって変化し、C1 と R2 の並列合成インピーダンスも変化します。この合成抵抗値を R2 の代わりに使用すれば増幅率が分かります。簡易計算で表にしてみます。

周波数	XC	合成	Gain	仮密計算
1kHz	1.6M	22k Ω	-0.1dB	0.0dB
10kHz	159k	19k Ω	-1.1dB	-0.1dB
20kHz	80k	17k Ω	-2.1dB	-0.3dB
30kHz	53k	15k Ω	-3.0dB	-0.6dB
50kHz	32k	13k Ω	-4.6dB	-1.6dB
100kHz	16k	9.2k Ω	-7.5dB	-4.6dB
200kHz	8.0k	5.8k Ω	-12dB	-9.3dB
500kHz	3.2k	2.7k Ω	-18dB	-16.9dB



概算で 10kHz ぐらいから減衰することが分かります。正確な計算だと 30kHz ぐらいからの減衰と見て取れます。20kHz 以下はほぼ平坦になっています。

アナログフィルタの基礎の基礎

この LPF は位相補償とも言われ、オペアンプの動作を安定させる役割があります。オペアンプが発信しやすい数 MHz 以上で 30dB 以上の減衰があり効果的に発振を防止します。

LPF と同じように R2 の抵抗値と C1 の容量から -3dB の減衰点であるカットオフポイントを求められます。

$$10k = 1/(2\pi f \cdot 220p)$$

$$f = 1/(2\pi \cdot 220p \cdot 22k)$$

$$f = 1/(2\pi \cdot 220 \cdot 22 \cdot 10^{-9}) = 72kHz$$

以上でフィルタの解説は終わりです。簡易計算はカーブが正しく出ませんが、傾向をつかむ程度なら十分です。

本当は1度ぐらい複素数を使ってきちんと計算して欲しいという気持ちもあるのですが、今でしたら LTSpice 等のツールを使用して周波数特性を表示させるのが一番効率が良いと思います。そういうツールを使用するにしても「回路動作のおよその傾向」をイメージできることは大切で、簡易計算は回路図を読み、回路を設計するときにとっても役に立ちます。

頭の中で回路の動作をイメージできるかどうかで回路の理解は大きく変わります。とにかく最初はイメージをつかむことを重視して、その後で細かい式を追いかけるとすんなり頭に入ると思います。

■おまけ(発展的内容)■

今回の解析は「定常状態」と呼ばれるものに対する解析です。定常状態というのは信号が安定した状態を意味します。多くの回路は信号を入れ始めた瞬間や、信号がなくなった瞬間は特殊な動作をします。

世の中の多くの回路はこの定常状態だけで考えることができますが、定常状態しか考えないと理解できない回路や設計もたくさんあります。

信号を厳密に扱い回路を適切に設計するには、瞬間瞬間をきちんと解析できる非定常状態の回路解析の技術が必要になります。

電磁気学をやったことある人なら、コイルやコンデンサの話聞いたことがあると思います。コイルやコンデンサは微分要素や積分要素になります。

この微分・積分を、ラプラス変換という特殊な操作によってかけ算とわり算の世界に持ってくることができ、ラプラス変換後の s に $j2\pi f$ を代入することで回路解析の世界につながります。物理現象としての素子の動作と回路動作は深く繋がっていて、昔の人が苦労して「回路工学」という学問を発展させてくれたおかげで、今こうして(複素数とはいえ)単純なかけ算とわり算で回路の計算ができるようになっていきます。

途中で、出力信号 V_o を入力信号 V_i で割った式を示しましたが、この式を伝達関数と言います。簡単に言えば「倍率」を発展させたもので、この式は周波数特性(f 特)のほか位相特性(複素数の偏角)を含んでいて、非定常状態における信号の特性を知ることができます。

以上分かりにくいところも多々あったかと思いますが、これにて終わり。感想や苦情、執筆依頼(笑)、お仕事などありましたら気軽にメールください。