

ヘッドフォンに合わせたアンプ出力部の設定

1. ヘッドフォンは単純な抵抗ではない

回路設計の際に用いられるシミュレーションでは、ヘッドフォンやスピーカーは、多くの場合、抵抗として取り扱われます。純粋な抵抗には周波数依存性はありません。しかしながらヘッドフォンのインピーダンスは図1に示すように入力される信号の周波数に依存して変化します。このような特性はヘッドフォンがケーブルやコイルによって実際のところは図2に示すような回路を構成しているからです。

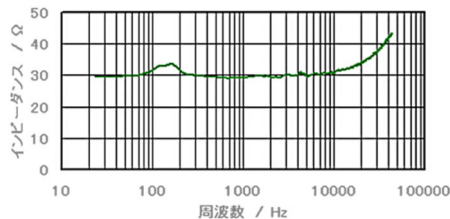


図1 ヘッドフォンのインピーダンスの周波数依存性の一例

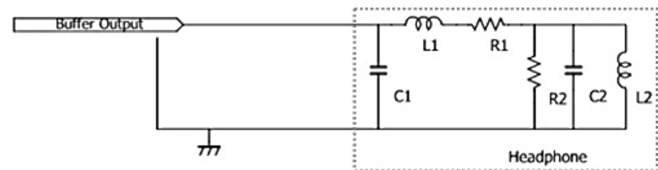


図2 ヘッドフォンの回路構成

C1はヘッドフォンとケーブルの容量性負荷です。数100pFになるとされています。R1, L1がヘッドフォンのコイルの抵抗とリアクタンスです。R1のさきと並列で接続されているC2, R2, L2はヘッドフォンのダイアフラムを駆動するコイルや磁石の特性により生じます。

周波数が高くなるとインピーダンスが徐々に上がってくるのはR1, L1に起因します。比較的周波数が低い領域における部分的なインピーダンスの増加はC2, R2, L2によるものです。C2, R2, L2によるインピーダンスの変動は、ヘッドフォンの音色の個性にかかわるものであり、アンプが十分な電圧出力さえできれば、特に気にするようなものではありません。またC2, R2, L2は周波数が低い領域のみで特性を示すものであり、R1, L1の効果が発現はじめる周波数域以上では無視することができます。

2. Zobel ネットワークの効果

他方、C1, R1, L1については高域における配慮が必要です。容量性負荷C1がアンプの発振の原因になりやすいことはよく知られています。これは、アンプのオープンループ出力抵抗とC1とでLPFが構成され負帰還に位相遅れが生じるからです。イージーな対策は出力部に抵抗を挿入することですが、アンプの出力インピーダンスが高くなります。出力インピーダンスが大きくなるとダンピングファクターが減少するため低音域で電磁制動が効きにくくなります。C1とR1+L1とはアンプの出力に対して並列になっています。これは共振回路にほかならず、条件によっては寄生発振を起こします。発振を防止するために図3に示すようにZobelネットワークを挿入します。

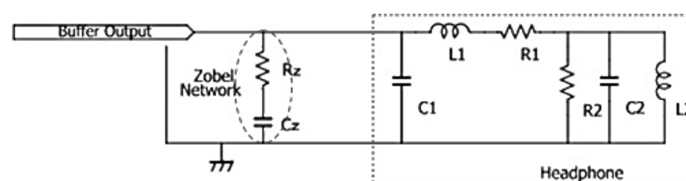


図3 ヘッドフォンアンプ出力へのZobelネットワークの挿入

作成 桑山 2014/4/19

Zobel ネットワークは抵抗 R_z とコンデンサ C_z からなる非常に単純な回路ですが、アンプ側から見たときのインピーダンスの変動を小さくすることができ、回路の安定性を高める効果があります。

Zobel ネットワークの抵抗 R_z とコンデンサ C_z の値の設定ですが、 R_z は R_1 とし、 C_z は $C_z = L_1/R_1^2$ としたときに、アンプ側から見たときのインピーダンスの変動は最小になります。ヘッドフォンの R_1 , L_1 成分は、測定によって得られたヘッドフォンのインピーダンス Z の周波数 f への依存性から知ることができます。これらの値の間には、 $Z^2 = R_1^2 + (2\pi f L_1)^2$ という関係があります。したがって原理的にはインピーダンスの周波数依存のグラフから任意の2点を取り、その時のインピーダンス Z の周波数 f をグラフから読み取って連立方程式を立ててそれを解けば R_1 , L_1 を得ることができます。ただ、周波数が低い領域では $(2\pi f L_1)^2$ の値はきわめて小さいので取扱いにくい。逆に、この性質を利用し、グラフのフラット部の Z が R_1 であるとし、グラフで Z の上昇が明瞭な高い周波数域での Z と f とをグラフから読み取り、上述の式に代入するやり方が簡単です。

3. アイソレータの効果

C_1 , R_1 , L_1 によるインピーダンスの変動は Zobel ネットワークによって減らすことができます。しかしながらパソコンレベルではまったく測定できない周波数の高い領域になると C_1 の効果でインピーダンスは減少していきます。この帯域でインピーダンスが小さいということは高周波が素通りするような状況になっていることを意味します。

アンプでは増幅率の非直線性が高周波の発生の原因のひとつですが、電波として飛び込んでくるものや、負荷の電磁的挙動から発せられるものもあります。可聴域のはるか外側の帯域の話です。これがアンプに及ぼす影響については、まったく影響はないという見解もあれば、負帰還に混入し相互変調を引き起こせば可聴域にも影響が及ぶ恐れがあるというような意見もあります。この高周波をアンプ側から送り込まないようにするため、あるいはヘッドフォン側からアンプ側に入り込まないようにするため、高周波の流れを分離するのが図4に示すアイソレータの役割です。この回路も単純で Zobel ネットワーク以降、ヘッドフォンの手前にインダクタ L_i と抵抗 R_i を並列に配するものです。

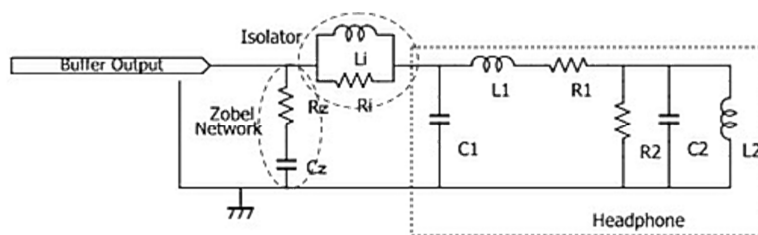


図4 ヘッドフォンアンプ出力へのアイソレータの挿入

低周波である可聴域のオーディオ信号は低容量のインダクタの影響はほとんど受けません。そのまま通り過ぎて行きます。インダクタは周波数が高くなるほどその効果を発揮します。しかしながらインダクタだけを挿入すると直列につながる L_i と C_1 は共振回路を構成します。そこで、 L_i と並列に R_i を置いてダンブさせます。 R_i を置くことで、高周波域におけるインピーダンスは R_i に収束し、それ以上大きくはなりません。高周波を減衰させるには十分な効果を持っています。

4. シミュレーション

Zobel ネットワークとアイソレータの効果をシミュレーションで確認します。図1で示したヘッドフォンをモデルにします。はじめに実測値から $L1$ と $R1$ とを求めます。500Hz～3kHz の Z から $R1=30\Omega$ とします。次に 40kHz の Z を 42Ω と読み取ります。関係式に代入すると $422 = 302 + (2 \times 3.14 \times 40000 \times L1)^2$ となり $L1=0.117\text{mH}$ と求めることができます。Zobel ネットワークとアイソレータの効果には影響しませんが、先に示したモデルの妥当性を裏付けるため $R2$, $C2$, $L2$ も設定しました。まとめると $C1=200\text{pF}$ $L1=0.117\text{mH}$ $R1=30\Omega$ $C2=220\text{uF}$ $L2=4.7\text{mH}$ $R2=4.7\Omega$ です。図5はこれらの値を用いてシミュレーションを行った結果です。実測値とよく一致します。上の図は Zobel ネットワークもアイソレータも取り付けしていない状態での Buffer Output からヘッドフォンを見たときのインピーダンスの周波数依存性です。ただ、このままでは Zobel ネットワークとアイソレータの効果を知るには周波数が低すぎますから、周波数範囲を 1GHz まで拡大した結果を図6に示します。縦軸を dB 表示にしています。というのも、インピーダンス変動の幅があまりに大きく、そのまま表示すると、小さいほうの値の変化がマスクされまったくわからなくなるからです。

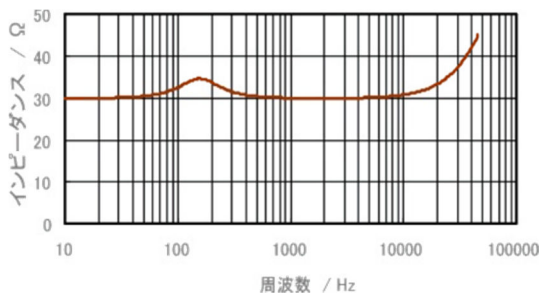


図5 ヘッドフォンのインピーダンスの周波数依存性シミュレーション I

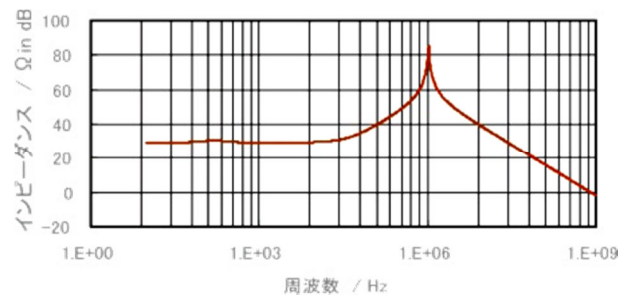


図6 ヘッドフォンのインピーダンスの周波数依存性シミュレーション II

$C1$ と $R1+L1$ による共振が 1MHz 付近に鋭いピークになって現れています。ピーク値は $18.5\text{k}\Omega$ にまで達します。高周波側は $C1$ の効果でインピーダンスは周波数が増えるほど減少しています。

Zobel ネットワークを設定します。 $Rz=R1$ $Cz = L1/R1^2$ より $Rz=30\Omega$, $Cz=0.13\text{uF}$ としました。シミュレーションすると図7のような結果を得ます。 $C1$ と $R1+L1$ による共振のピークは消してしまうことができます。つづいてアイソレータを挿入します。 $Li=1\text{uH}$, $R=22\Omega$ です。図8のようになります。 $C1$ の効果によるインピーダンスの減少が一定値で落ち着いていることがわかります。

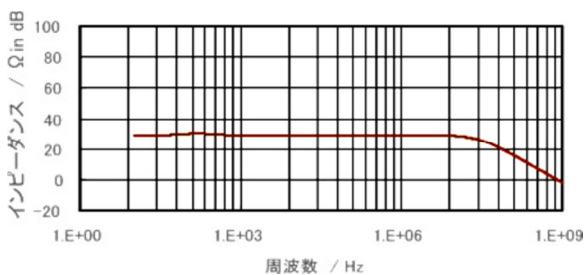


図7 ヘッドフォンのインピーダンスの周波数依存性シミュレーション Zobel ネットワークの効果

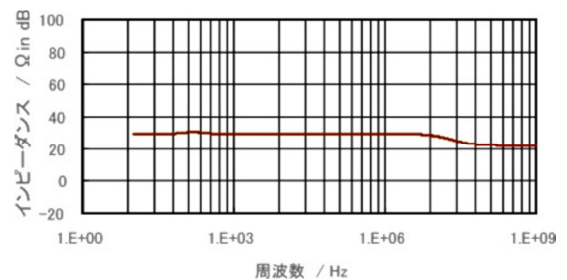


図8 ヘッドフォンのインピーダンスの周波数依存性シミュレーション アイソレータの効果

5. 結局のところ Zobel ネットワークとアイソレータの効果とは

結局のところ Zobel ネットワークとアイソレータの効果とは、アンプのバッファ出力からみた負荷であるインピーダンスの平準化、つまりはヘッドフォンの複雑な負荷を単純な抵抗のようにしてしまうことになるでしょう。負荷が高い周波数域まで安定した状態であれば、アンプが不測の挙動を示す可能性は少なくなります。