

携帯型機器の音質が受動素子によって劣化するのか？

受動素子は、オーディオ回路のゲイン設定やバイアス、電源除去、直流成分カットなどに使われています。ところが、携帯型オーディオ機器では面積や高さ、コストが重視されるため、小型・低コストで特性があまりよくない受動素子を使うことがよくあります。このため、音質がどのように変化するのか検討しておくことは意義のあることです。不適切な部品を採用すると、システム性能がはっきりと低下することがあるからです。

抵抗やコンデンサによって音質が変化することはないという意見もありますが、広く使われている受動素子の非線形性によって、全高周波歪み(THD)が大幅に劣化することがあります。オーディオ性能を制限するのはアンプやDACといった能動素子だと考えられていますが、受動素子の非線形特性の影響のほうが大きい場合もあります。

非線形性の原因

コンデンサや抵抗には電圧係数といわれるものがあります。つまり、素子の端子間電圧が変化すると素子の物理特性が変化し、その結果、抵抗値や容量が若干、変化してしまいます。たとえば、電圧がかかっていない状態で1.00k という抵抗に10Vを印加すると1.01k になってしまいます。どの程度変化するかは、素子の種類や構造によって、そしてコンデンサの場合は化学特性によっても大きく異なります。電圧係数に関する情報は、定格電圧に対するパーセントと静電容量の変化率(パーセント)というグラフでメーカーから得られる場合もあります。

最近のフィルム抵抗は電圧係数が小さく、簡単に測定できないほどです。一方、コンデンサは理想からほど遠く、性能の制限要因となることがあります。

- 電圧係数：すでに説明したとおりです。
- 誘電吸収(DA)：放電後もコンデンサに電荷が残るメモリのような現象です。
- 等価直列抵抗(ESR)：周波数によって効果が異なります。ヘッドフォンやスピーカなどの低インピーダンスデバイスを直列接続したコンデンサで駆動するとき、この効果によって出力が低下することがあります。
- マイク効果：コンデンサの中には圧電効果を持つものがあります。つまり、コンデンサに外力や曲げが加えられると端子間に電圧が発生することがあります。

- 精度：大容量コンデンサ(数 μF 以上)の精度はそれほど良くありません。一方、抵抗は、1%や2%の精度にすることは比較的容易です。

それでは、オーディオ信号パスのコンデンサによる音質劣化を定量的に測定できる方法を、簡単なテスト回路と一般的なオーディオテスト機器を使って実現してみましょう。なお、この記事の目的は、この現象に対する注意を喚起することと十分な比較検討が可能なテスト方法を紹介することであり、あるサイズや定格電圧、ケース種類の善し悪しを判断することではありません。

テスト方法

コンデンサの非線形AC特性はすぐにわかります。アナログオーディオの周波数応答を計測すると(必然的にアナログのみを考えます)、どの回路ブロックにもハイパス、ローパス、あるいはバンドパスのフィルタ回路ができており、そのようなフィルタ回路を持つ非線形性の効果ははっきりと認識することができます。

シンプルなハイパスRCフィルタを考えてみましょう(図1)。 -3dB カットオフ周波数よりはるかに高い周波数では、コンデンサのインピーダンスは抵抗と比較してずっと小さくなります。コンデンサに高周波数のAC信号を印加しても、端子間にはほとんど電圧は発生しないため、電圧係数による変動もごく低いレベルに留まります。しかし、コンデンサを流れる信号電流によってコンデンサのESRに電圧が発生します。ESRの非線形成分の合計があるレベルに達すると、THDの劣化につながります。

一方、 -3dB カットオフ周波数近くでは、コンデンサと抵抗のインピーダンスは同レベルになります。その結果、入力信号に対する減衰率が比較的低い領域で、コンデンサ両端にかなりのAC電圧が発生することになります。つまり、この領域で電圧係数による影響がもっとも強く現れるのです。

-3dB カットオフ周波数におけるTHDに焦点をあてたテストにより、主に電圧係数により発生する非理想的な挙動が明らかになりました。使用したテスト回路は、 -3dB カットオフ周波数が1kHzのハイパスフィルタとオーディオアナライザ(オーディオプレジジョンシステムワン)で、構造や化学特性、種類の異なるさまざまなコンデンサの

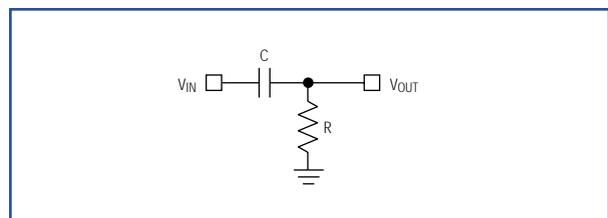


図1. シンプルなハイパスRCフィルタ

THD + Nの劣化を計測しました。なるべく多種類のコンデンサがテストできるように、容量は1 μ Fにしました。これに150 Ω の抵抗を組み合わせ、公称1kHzカットオフのヘッドホンフィルタとします。コンデンサ両端にDCバイアスがかかっていないことに注意してください。入力側も出力側もDC電位は同じです。

ポリエステルコンデンサと基準ベースライン

25V貫通型ポリエステルコンデンサの特性を、周波数とTHD + Nの関係を示した図2に、テスト装置の計測限界とともに示します。貫通型ポリエステルコンデンサは、携帯型オーディオ機器ではあまり使われませんが、電圧係数によるTHD劣化がほとんどないことがわかります。ポリエステルコンデンサでも1kHz以下の周波数ではTHDの上昇が見られますが、この周波数範囲では出力信号自体が低下しており、アナライザに入力されるSN比(プラス歪み)が小さくなっていることに注意が必要です。注目すべきなのは1kHz以上の周波数領域で、この領域でポリエステルコンデンサの特性は非常によく、基準測定結果からほんの少し劣化するだけです。

タンタル誘電体

携帯型デバイスでは、ヘッドホンへのDC電圧印加をブロックするとき、特に数 μ F以上の容量が必要なとき、多くの場合、タンタルコンデンサが使われます。図3 (THD + N 対周波数)に、よく使用されるSMタンタルコンデンサと実験でよく使用する従来型の貫通型「ディップ型」タンタルコンデンサ3種類の特性を比較して示します。容量はいずれも1 μ Fで、物理的な大きさと定格電圧だけが異なります。詳細は表1をご覧ください。コンデンサにDCバイアスはかけていません。

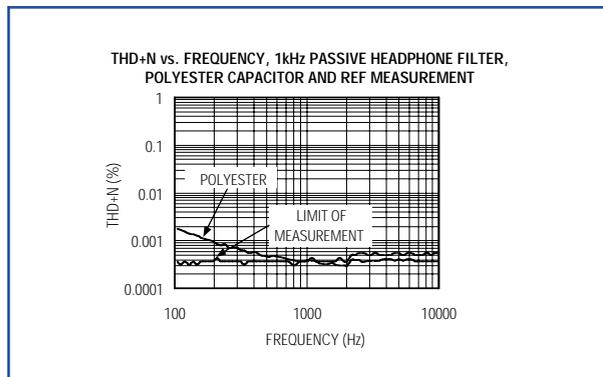


図2. ポリエステルコンデンサを使用した1kHzハイパス受動フィルタのTHD + Nの周波数特性。比較のために基準測定結果も表示しています。

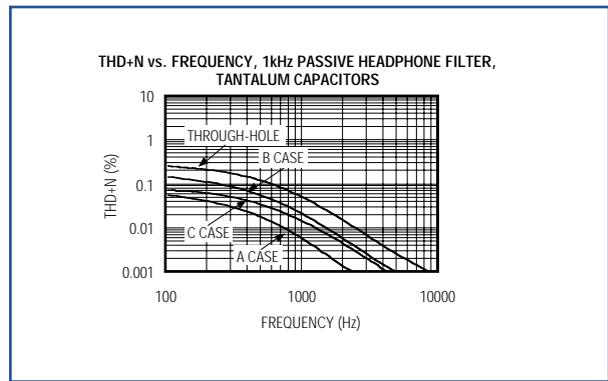


図3. 各種タンタルコンデンサを使用した1kHzハイパス受動フィルタのTHD + Nの周波数特性の比較です。

セラミック誘電体

オーディオ段間AC結合やバスブーストフィルタ回路などでは、セラミックコンデンサがよく使われます。図4に示すように、誘電体の種類でいろいろなセラミックコンデンサがあります。詳細は表2をご覧ください。

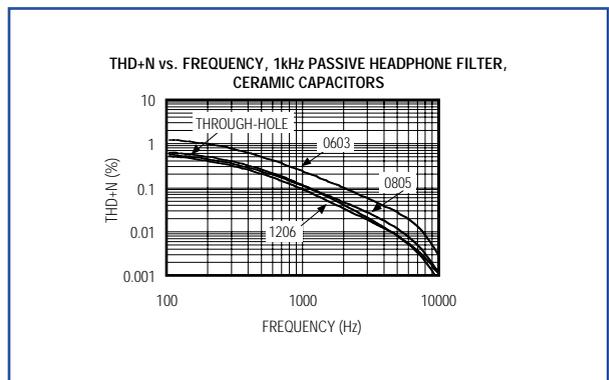


図4. 各種セラミックコンデンサを使用した1kHzハイパス受動フィルタのTHD + Nの周波数特性の比較です。

表1. 図3に示すSMタンタルコンデンサの比較

Value	Case Size L x W (mm)	Voltage Rating (V)
1 F	A (3.2 x 1.6)	25
1 F	B (3.5 x 2.8)	35
1 F	C (6.0 x 3.2)	50

表2. 図4に示すSMセラミックコンデンサの比較

Value	Case Size	Voltage Rating (V)	Dielectric Type
1 F	0603	10	X5R
1 F	0805	16	X7R
1 F	1206	16	X7R

図4の一つは、実験に使用するものから適当に選んだ貫通型セラミックコンデンサです。特性が最も悪かったのはX5R電解質を使ったセラミックコンデンサで、-3dBポイントでTHDが0.2%に達しました。これは、歪みが-54dBレベルだということを意味します。16ビットのオーディオDACやCODECのTHDは、フルスケールに対し、これよりも少なくとも一桁は小さいレベルであるのが普通です。なお、COG誘電体は電圧係数がとても小さいのですが、今のところ0.047 μ F以下の容量のコンデンサしかありません。今回のテストでは1 μ Fのコンデンサで比較しているため、COGコンデンサのテストは行いませんでした。

コンデンサ電圧係数の影響を避ける方法

図5は、新しい形のAC結合を採用したライン入力トポロジで、従来と比較して入力コンデンサの容量が大幅に小さくてすみます。この例での入力コンデンサ(C1)は0.047 μ Fとなっており、COG誘電体を使った1206ケースサイズのセラミックコンデンサを採用して電圧係数によるTHD劣化を最小に抑えることができます。オペアンプ(MAX4490などの低バイアス電流デバイス)へのDCフィードバックは、100k Ω 抵抗2本で行います。オーディオ周波数に対するDCフィードバックパスの影響はC2とR5で減衰されるので、フィードバックは基本的にR1とR2からC1経由で行われます。図5の回路定数は、-3dB周波数は5Hzに設定されています。

このような形式の複合的なフィードバックをかけると最終的なLF減衰率が1次になりますが、ハイパスカットオフ周波数周辺の応答を2次にすることは可能です。そのようなチューニングを行うために素子の値を図6から変更する場合には、オーバシュートやピークが発生しないように注意する必要があります。例示した値は、ハイパス領域がなるべくフラットになるようにしてあります。

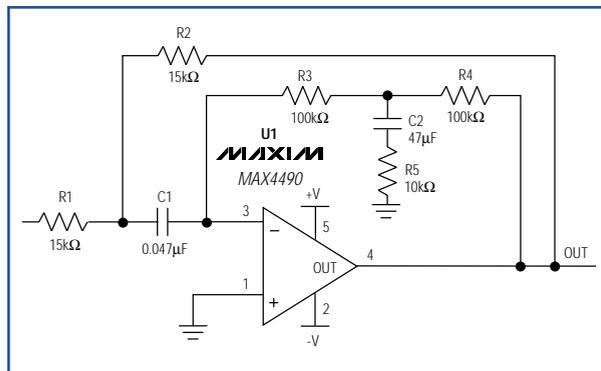


図5. 新しい形式の入力段で、電圧係数による劣化を抑えることができます。普通のAC結合コンデンサをアンプの誤差パスに含め、小容量コンデンサを使えるようにした結果、携帯型オーディオでもCOGコンデンサが利用できるようになりました。

この回路は、疑似差動入力段(グラウンド検出)や差動入力段に簡単に適用できます。

図7は、DirectDriveという新技術を採用したステレオヘッドフォンドライバIC(MAX4410)です。この技術は、単一のプラス電源を使いながら出力バイアスを0Vにするもので、ヘッドフォンに対して直接DC結合ができます。利点がいっぱいとあります。

- 大容量のDCブロッキングコンデンサ(100 μ F ~ 470 μ Fがよく使われます)が不要で、電圧係数によるTHD劣化が大幅に低減されます。
- 図7の例では、入力コンデンサと入力抵抗で決まる-3dBカットオフ周波数が1.6Hzと非常に低くなっています。従来型のAC結合ヘッドフォンドライバだと、1.6Hzという-3dBカットオフ周波数で16 Ω ヘッドフォンを駆動するためには6200 μ Fものコンデンサが必要になります。図7では、また、負荷によって低周波数応答が変化することがありません。
- 大きなコンデンサが不要なので、プリント基板の小型化が可能になります。また、MAX4410チャージポンプ回路が必要とする1 μ Fや2.2 μ Fのセラミックコンデンサは、大容量コンデンサよりも安価です。
- グラウンド基準負荷の負荷電流をシンク/ソースできる出力とするために、チップ内部でマイナス電圧を生成しています。このマイナス電圧(PV_{SS})がプラス電源(V_{DD})を反転したもののなので、出力側の電圧スイング(約2V_{DD})が従来型の単一電源、AC結合ヘッドフォンドライバの2倍になります。

この例では、オーディオ帯域に対する入力コンデンサ電圧係数の影響を抑えるのは比較的簡単で、コンデンサの容量を大きくするだけです。入力抵抗が10k Ω なら、C_{IN}を10 μ Fにすればいいのです。これで-3dBポイントが1.6Hzと、電圧係数の非線形性の影響が発生する周波数を、

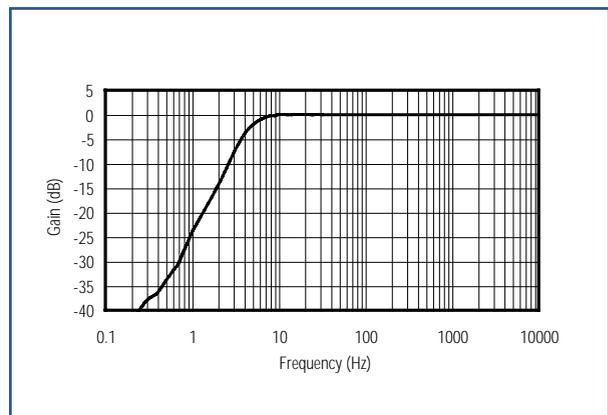


図6. 図5の回路例の周波数応答です。10Hzからなだらかに低下し、-3dBポイントが5Hzになっています。低い周波数における最終的な減衰率は20dB/桁です。

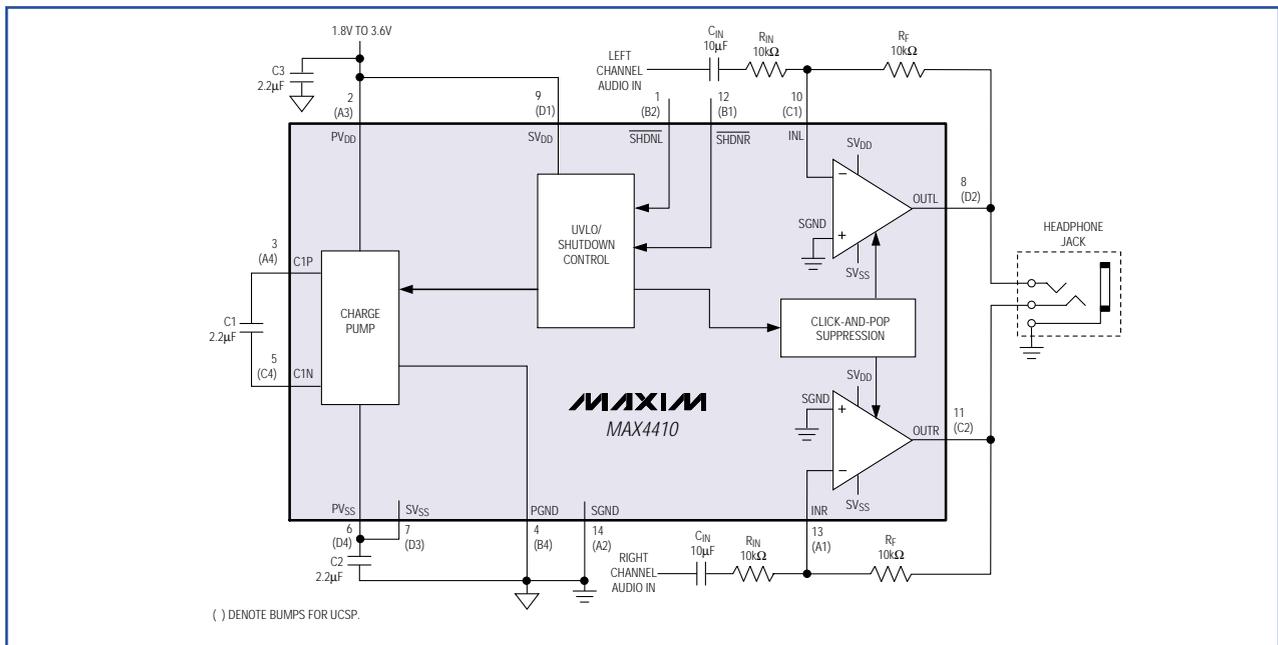


図7. MAX4410ステレオヘッドフォンドライバの回路例。C_{IN}を10μFにすると、電圧係数による影響が出る領域を可聴周波数以下に抑えることができます。出力側大容量カップリングコンデンサは不要です。

再生される最低周波数より少なくとも1桁小さくすることができます。

大容量コンデンサについては、図8に100μFのコンデンサと16Ω抵抗で構成した受動ハイパスフィルタの例を示しています。-3dB周波数である100Hzでは、いずれのタイプのコンデンサも電圧係数によってTHDが大幅に劣化しています。タンタルコンデンサでは-3dBカットオフ周波数におけるTHD+Nが0.2%となっていますが、これは性能が最も悪いセラミックデバイス(図4)と同レベルです。このようなデバイスを、マキシムのDirectDriveなどの技術によってオーディオパスから取り除くと、特に低周波数領域における音質が大幅に改善されます。図8の基準測定結果(測定限界)は、MAX4410を使用した場合です。

まとめ

受動素子によって、アナログオーディオの音質がはつきりと低下することがあります。その効果や評価は、標準的なオーディオテスト機器で行うことができます。今回、テストしたコンデンサの中でTHDが小さかったのは、アルミニウムコンデンサとポリエステルコンデンサでした。逆にTHD性能が悪かったのはX5Rセラミックコンデンサでした。

アナログオーディオ段でAC結合コンデンサをなるべく使わなくてすむように能動素子を選ぶことが重要です。

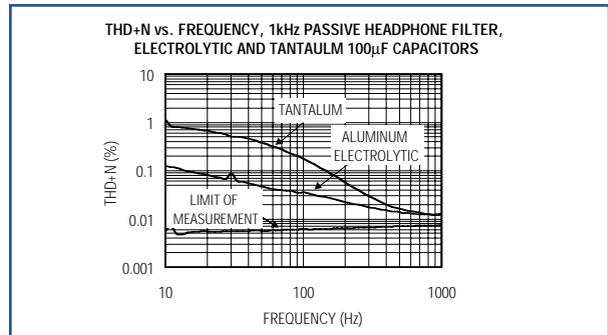


図8. 100μFという大容量コンデンサで16Ω負荷を駆動したときのTHD+Nの周波数特性です。タンタルコンデンサもアルミニウムコンデンサも、-3dB周波数である100HzでTHDが大幅に劣化していません。そのような大容量の出力コンデンサは、マキシムのDirectDriveヘッドフォンアンプでは不要です。

たとえば、差動信号パスとしたりヘッドフォン駆動をDirectDrive素子(MAX4410)を使ったりするわけです。可能であれば、C0GコンデンサやPPSコンデンサが使える容量の低いオーディオ回路を設計するといいいでしょう。AC結合されたオーディオ段で電圧係数の影響を抑えるためには、-3dBポイントを必要な位置の10倍程度まで引き下げるなどの対策により、影響を受ける範囲を可聴周波数以下に抑える方法があります。