

デジタル・オーディオ用DACの ダイナミック特性テスト

このアプリケーションノートは、デジタル・オーディオ・アプリケーションにおけるD/Aコンバータのダイナミック特性(THD +N、S/N比、ダイナミック・レンジ、チャンネル・セパレーション)のテスト方法について記述しています。

実アプリケーション・セットにおいて、例えば、音楽CDプレーヤではそのテスト方法についてはEIAJで規格化されていますが、最近のマルチメディア・アプリケーションにおいては明確なテスト方法に関する規格が無いため、評価方法もアプリケーションによって異なります。また、デジタル・オーディオはアプリケーションの別に関係なく、既知のサンプリング理論の上に成立している技術であり、ナイキストの定理も含めてD/A変換における基本は忘れてはなりません。

特に最近では、CD-ROM、CD-I、VideoCD、DVD、セットトップボックス、PCサウンドカード等非常に広範囲なマルチメディア・アプリケーションにおいて、デジタル・オーディオ用DACが用いられるようになりましたが、その正しい評価、テスト法に関しては統一されておらず、測定条件も測定者によって異なるのが現状です。

こうした観点から、本アプリケーションノートにおいては、デジタル・オーディオ用DACの動作に対する理解とそのテスト方法、条件について解説しています。

サンプリング理論とナイキスト定理

デジタル・オーディオの基本要素には量子化と標本化がありますが、信号帯域とサンプリング・レート(標本化)の関係はナイキストの定理に基づいています。

図1において、 $f_{a \max}$ は最高信号周波数、 f_s はサンプリング・レートであり、デジタル・データのスペクトラムは f_a (信号周波数スペクトラム)と $f_s \pm f_{a \max}$ (サンプリング・スペクトラム)とで構成されます。

ここで、 f_s と $f_{a \max}$ との関係は

$$f_s \geq 2 f_{a \max} \quad (1)$$

でなければならず、図1(a)の場合は問題ありませんが、図1(b)のように(1)式を満足しない場合にはスペクトラムが交差し、エリアシング ϵ が発生します。これらの関係はナイキスト定理として広く知られていますが、D/Aコンバータのテストにおいてもこの定理は適用されますので特に正しく理解しておかなければなりません。

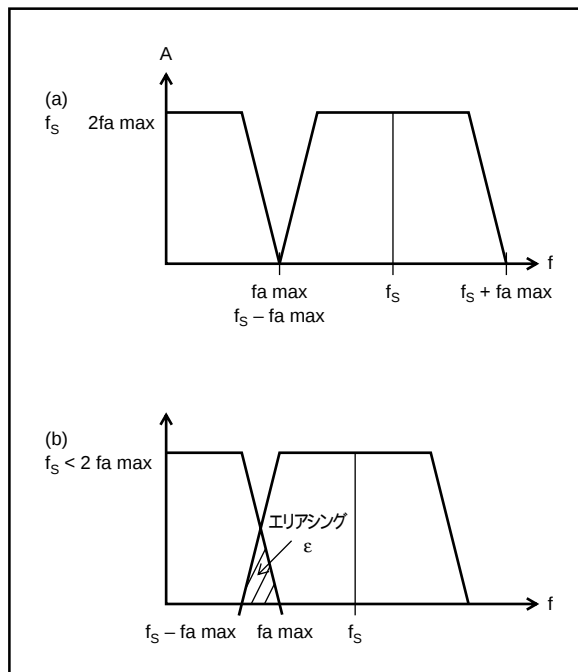


図1. サンプリング・スペクトラムとナイキスト定理

図1に示したスペクトラムは当然D/A変換した場合のアナログ信号にも適用されます。これらを考慮して、CD - DA(音楽CD)においては、

$$\begin{aligned} f_{a \max} &= 20\text{kHz} \\ f_s &= 44.1\text{kHz} \end{aligned}$$

に設定されています。

D/Aコンバータの構造による出力スペクトラムの違い

最近のデジタル・オーディオ用D/Aコンバータ・アーキテクチャは、汎用アプリケーションにおいては、従来のR-2Rラダー型から $\Delta\Sigma$ (ノイズ・シェーバ、1ビットの呼称もあり)型にその主流が変わってきています。また、D/A変換において、オーバー・サンプリング・デジタル・フィルタと組み合わせる変換が非常に多くなっていますが、これらの本来の目的と原理について解説します。

Conventional DAC の出力スペクトラム

R-2Rラダー、カレント・セグメント等のConventional DAC、(例えば、パー・ブラウン製品ではPCM56、61、63、1702等のモデル)は $\Delta\Sigma$ 型とその基本動作はまったく異なり、入力デジタル・データがそのままD/A変換スペクトラムとなります。DACから発生するノイズはICデバイスの残留ノイズのみで、通常このノイズレベルは -110dB 以下であり、ほとんど無視できます。この様子を図2に示します。

Conventional DAC において、必要とするオーディオ・データを取り出し、必要としないサンプリング・スペクトラム $f_s \pm f_{a\text{max}}$ を除去するには、図3に示すようにDAC出力にPost LPF(ローパスフィルタ)を接続します。Post LPFに要求される理想特性は、ナイキストの定理により $f_{a\text{max}}$ では通過帯域特性で、 $f_s - f_{a\text{max}}$ では $-\infty$ 減衰量となります。

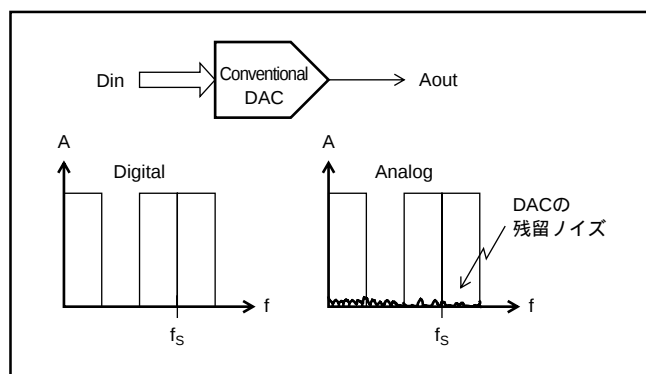


図2. 従来型DACの出力スペクトラム

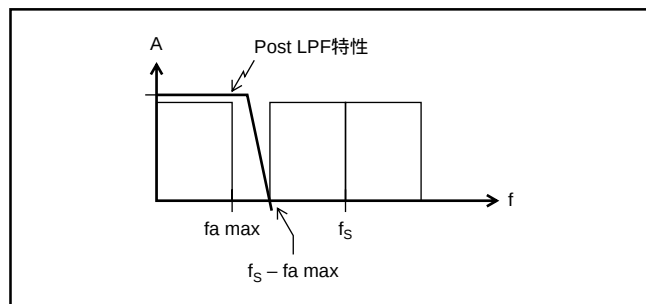


図3. Post LPFによる信号再現

オーバー・サンプリング・デジタル・フィルタのスペクトラム

最近のデジタル・オーディオでは、オーバー・サンプリング・デジタル・フィルタを組み合わせることでD/A変換を行うことが一般的になっています。単にデジタル・フィルタと呼称することもあります。このデジタル・フィルタの本来の使用目的はPost LPFの要求減衰特性の軽減にあります。この機能と動作は出力スペクトラムとテスト条件の関係を理解する上で極めて重要なので、ここで改めて解説します。

デジタル・フィルタは正確には、インターポレート(オーバー・サンプリング)とデジタル・フィルタリングの機能により構成されており、その動作と各部のスペクトラムを2倍オーバー・サンプリングを例に図4に示します。まず、基準サンプリング・レート f_s のデータはインターポレート(オーバー・サンプリング)され、 f_s に対して $2f_s$ のデータを補間し f_s と $2f_s$ の両スペクトラムを出力します(図4b)。このままではPost LPFに要求される減衰特性は全く原サンプリングの場合と同じです。ここで、(b)のサンプリング・データはデジタル・フィルタ演算(ローパスフィルタ)により、原サンプリング・スペクトラムは抑圧(フィルタリング)され、デジタル・フィルタ出力は(c)のようになります。(c)において、原スペクトラム f_s 成分の抑圧レベルATT はデジタル・フィルタの構成次数(タップ数)でほぼ決定されます。ここで注意しなければならないのは、デジタル・フィルタの減衰量ATT(正しくは、阻止帯域減衰量)で、市販のデジタル・フィルタIC、またはDAC内蔵デジタル・フィルタのいずれもモデルによってその性能差は大きく、この減衰量は -30dB 程度のものから -100dB 以上のものであります。別の言い方をすれば、ATTレベルの再量子化ノイズを発生していることになります。図4(c)において、仮に減衰量ATTレベルが -100dB 以上あれば、Post LPFに要求される遮断特性はより軽減されることになります。

ここでは2倍オーバー・サンプリングを例にしましたが、4倍、8倍オーバー・サンプリングにおいては図4の(インターポレート + デジタル・フィルタ)の構成をカスケード接続して目的のオーバー・サンプリング・レート($4f_s$ 、 $8f_s$)を得ます。

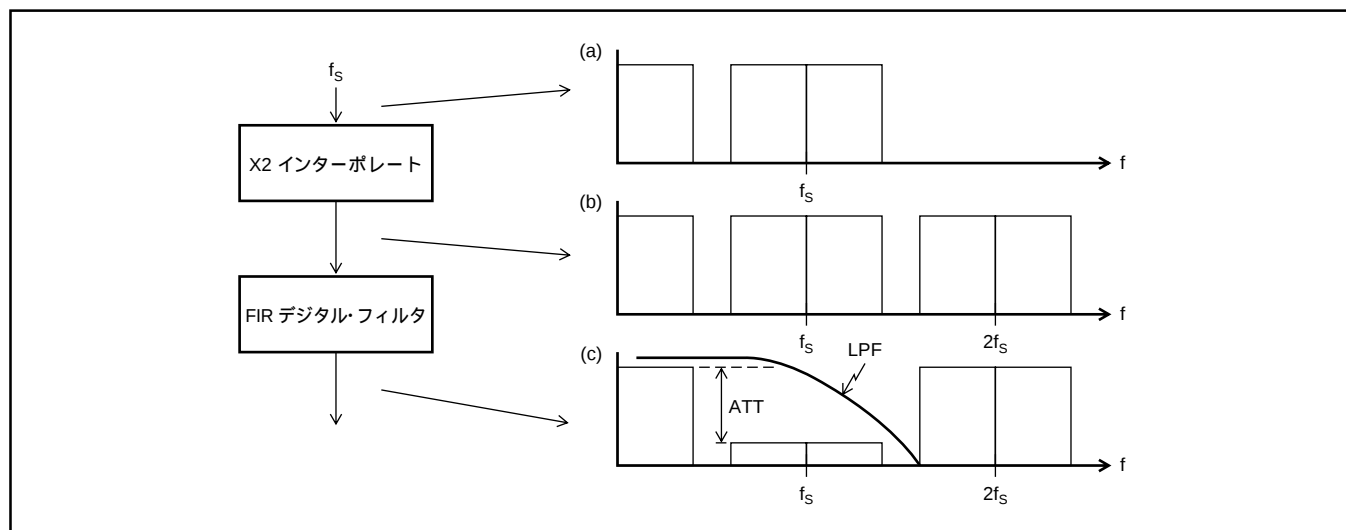


図4. デジタル・フィルタの機能と動作

ΔΣ型DAC出力スペクトラム

ΔΣ型(ノイズ・シェーピング、1ビット)DACにおいては従来型DACと異なり、帯域内量子化ノイズをΔΣ変調(ノイズ・シェーピング)で抑圧しているため、帯域外ノイズ・スペクトラムは非常に大きくなります。このノイズ・シェーピング特性はΔΣ変調器の構成(次数)とオーバー・サンプリング・レート nf_s で決まり、これにより帯域内(通常 $f_{a\max} = 20\text{kHz}$)のダイナミック・レンジ(DR)が決まります。この様子を図5に示します。

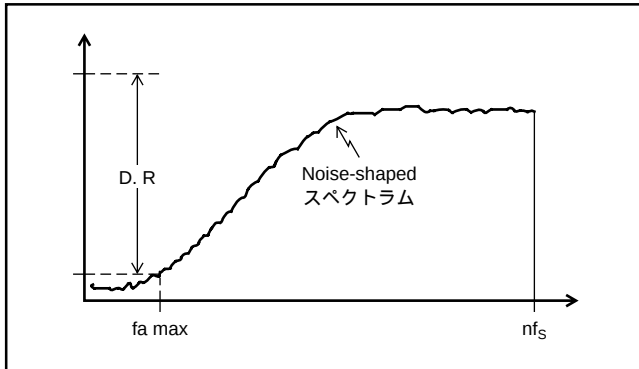


図5. ΔΣ DAC(変調)のスペクトラム

ΔΣ型DACにおいては、1チップにデジタル・フィルタと組み合わされているのがほとんどで、この場合、デジタル・フィルタ部のATT(阻止帯域減衰量)特性とΔΣ部のノイズ・シェーピング特性の総合でDAC出力スペクトラムが決まります。すなわち、デジタル・フィルタの阻止帯域減衰量(ATT = -p dB)にΔΣ変調のノイズ・シェーピング特性が重畳されて出力スペクトラムとなります。この様子を図6に示します。

ダイナミック特性テストの定義と目的

デジタル・オーディオ・アプリケーションにおいては、DACを評価する場合、そのダイナミック特性をテストするのが一般的ですが、ここでは改めて各ダイナミック特性テストの定義と目的について解説します。

THD + N特性

THD + N特性テストの目的は、DACの非直線性エラーに起因して発生する高調波の総合歪(THD)と実動作時の帯域内ノイズ(N)特性を把握することにあります。人間の聴感に影響するのは歪み感とノイズですから、このTHD + N特性は最も重要です。図7に示すように、オーディオ基本波の再生において、DACの非直線性によって発生する高調波は2次、3次、4次……と基本波周波数のn倍の関係で発生します。

この高調波のトータルを全高調波歪(Total Harmonic Distortion)で表わし、通常7次から9次程度までの歪量として測定されます。このTHDに帯域内ノイズを加味したのがTHD + N特性で定義され、あくまでもこのTHD + Nテストの目的は、DACの非直線性による歪量と動作時のノイズ量のテストです。したがって、前述のDAC出力スペクトラムで示したように帯域外(20k以上)にあるスペクトラムは完全に除去しなくてはなりません。

このことから、測定帯域は通常20kHzに設定されます。測定帯域が例えば、30k、80k等の場合、正確なTHD + Nではなく、帯域外スペクトラムを測定していることになり、本来の歪測定の意義

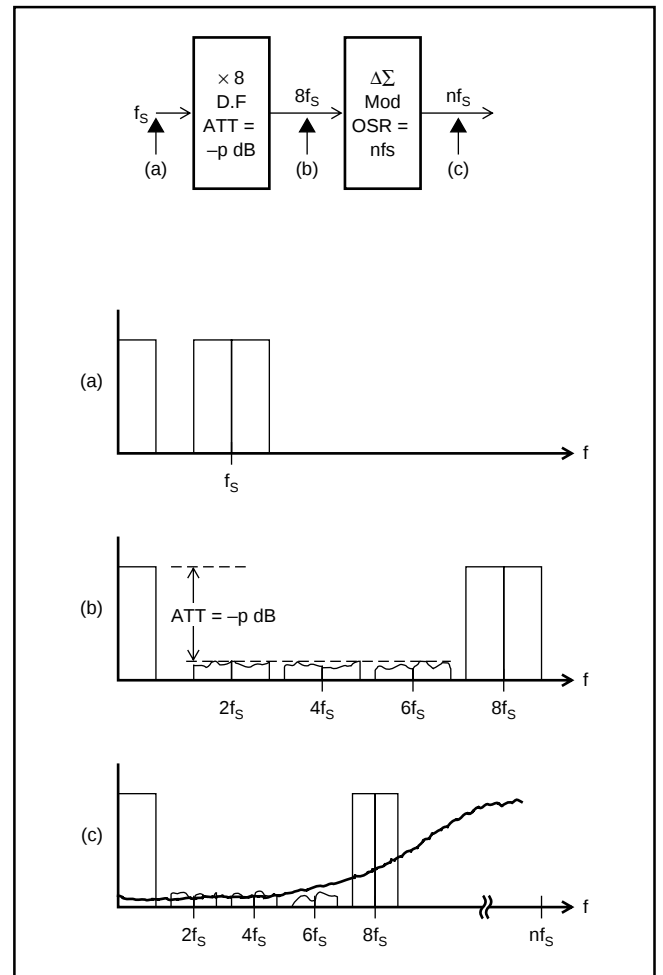


図6. デジタル・フィルタ付ΔΣ DACのスペクトラム

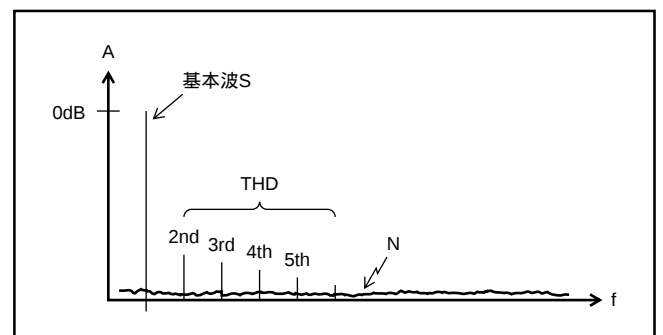


図7. 高調波のスペクトラム

と反することになります。

THD + Nテストは、DACの特定レベルでの誤差を見るために

THD + N対出力レベル

THD + N対信号周波数

のパラメータで行うことが一般的です。

ダイナミック・レンジ

コンシューマ・デジタル・オーディオにおける、特にCD - DA(音楽CD)アプリケーションでは、ダイナミック・レンジのテストは-60dB出力時のTHD + Nレベルによって定義されています。理論ダイナミック・レンジ(DR)はD/A変換の量子化分解能n(bit)によって決まり、次式で求めることができます。

$$DR = 6.02n + 1.78 \text{ (dB)}$$

(2)

16ビットでの理論ダイナミック・レンジは(2)式より98dBとなります。実際のDACにおいては、そのDACのTHDとノイズ、理論量子化ノイズによってダイナミック・レンジが決定されます。

ダイナミック・レンジ・テストの目的は、実際の再生でいかに広いレンジでいかに微少な信号まで信号を再生できるかを見るために行われます。一般的に、このテストは聴感補正を行って実施されます。

S/N比

S/N比の定義はDACの基準信号レベルと無音時のノイズレベルとの比で、無音時にいかに静粛(低ノイズ)かを判断する目的で行われます。S/N比テストでは、ダイナミックレンジ・テストと同様に聴感補正を行います。

ダイナミック・レンジとS/N比テストの結果を比較することにより、例えば図8に示すように動作状態によりノイズ・レベルの異なるDAC別の特長を見ることができます。

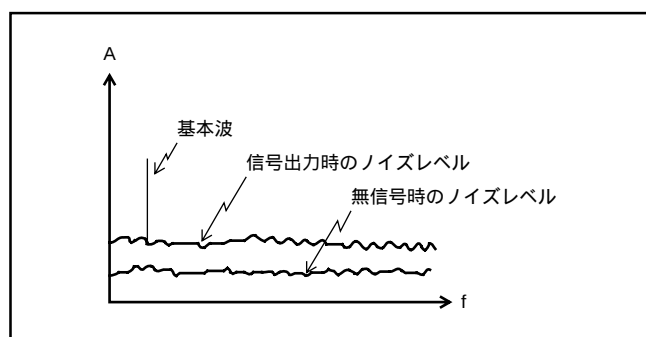


図8. 動作によるノイズの違い

チャンネル・セパレーション

チャンネル・セパレーションは信号チャンネルと無音チャンネル出力との比で定義され、ステレオ感を把握するために行われます。

正しいダイナミック特性のテスト方法

これまで解説した通り、DACのダイナミック特性テストはDACの方式や構成、デジタル・フィルタ特性の差異による帯域外スペクトラムの影響を考慮しなければなりません。

「全てのダイナミック特性テストにおける共通テスト条件はナイキストの定理に基づく帯域制限です。」

このことは一般的な全てのD/A変換に言えることですが、特にデジタル・オーディオ・アプリケーションでは誤った条件でテストされることがあり、十分理解しなければなりません。図9(a)は(テスト用20k LPF)によって帯域制限が十分な場合、図9(b)はテスト用LPFによる帯域制限が不十分な場合、それぞれのスペクトラムを示したものです。図9(a)では、信号帯域($f_{a\max} = 20\text{kHz}$)より高い周波数スペクトラムはテスト用20k LPFによって十分抑圧されているので、THD + N、S/N比、ダイナミック・レンジ等の特性は正しく測定することができます。一方、図9(b)の場合は、 $f_{a\max}$ より高い周波数に分布するスペクトラム(デジタル・フィルタの再量子化ノイズと $\Delta\Sigma$ 型DACのノイズ・シェーピング・スペクトラム)の抑圧が不十分で、例えば、THD + Nレベルよりも非常に大きな帯域外スペクトラムを測定していることになりま

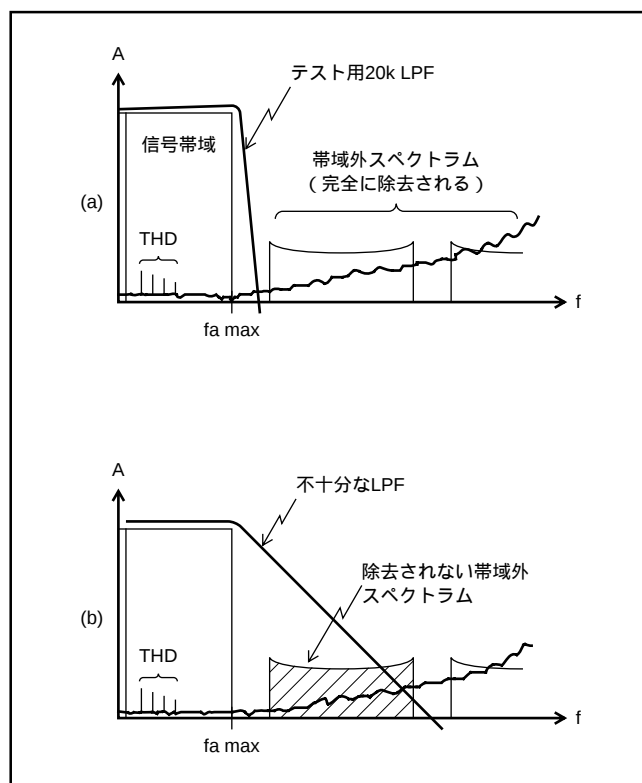


図9. 測定用 LPF の概念

す。この図9(b)条件でのテストは帯域外スペクトラム・レベル・テストになってしまいます。すなわち、テスト用20k LPFの使用はダイナミック特性テストにおける絶対条件となります。

テスト用20k LPFの条件

デジタル・オーディオ用DACのTHD + Nレベルは現在、 -80dB (0.01%) から -90dB (0.003%) 程度であり、このレベルの値を正しく測定するには、少なくとも -90dB 以上の帯域外スペクトラムの抑圧が必要です。図10にサンプリング・レート $f_s = 44.1\text{kHz}$ 、 $f_{a\max} = 20\text{kHz}$ の場合を例にテスト用LPFの必要条件についての考察を示します。

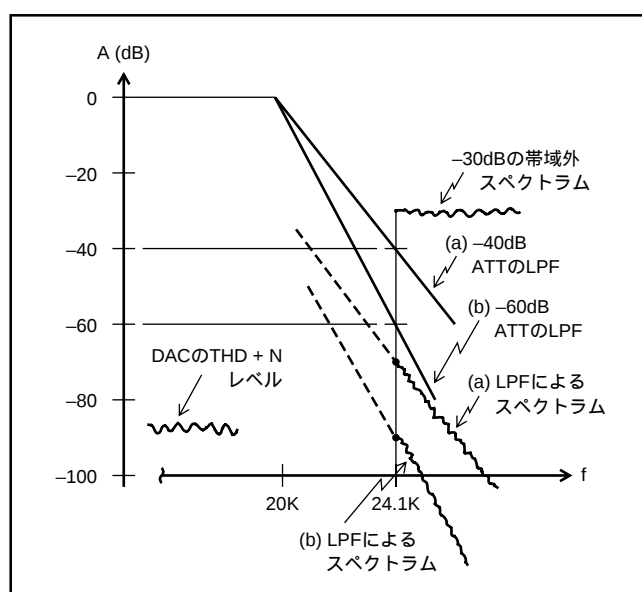


図10. テスト用 LPF の条件

ナイキストの定理により、サンプリング・スペクトラムの分布は、帯域外では $f_s - f_{a \max} = 44.1k - 20k = 24.1kHz$ となり、この 24.1k 以上のスペクトラムのレベルはデジタル・フィルタの ATT (阻止帯域減衰量) で決まり、ここでは、 $ATT = -30dB$ と設定します。ここで、24.1k におけるテスト用 LPF の減衰量を 2 つのケース、

(a) $= -40dB$

(b) $= -60dB$

とした場合、 $-30dB$ レベルに分布する帯域外スペクトラムはそれぞれ、24.1k において、

(a) $= -30 - 40 = -70 dB$

(b) $= -30 - 60 = -90 dB$

となります。したがって、 $-90dB$ レベルの THD を測定する場合、(a) の場合は、THD レベルよりも帯域外スペクトラム・レベルの方が大きく、正しい THD + N 測定は行えません。一方、(b) の場合はほぼ正しく THD + N 特性を測定することができます。このように、テスト用 20k LPF はある程度急峻なカット・オフ特性が必要です。

EIAJ における CD プレーヤのテスト法

EIAJ (Electronic Industrial Association of Japan) においては、1985 年に CD プレーヤの測定方法 CP - 307 を制定して、後に CP - 2402 に改訂していますが、この中では CD プレーヤの測定方法を詳しく規格化しています。

この規格は CD プレーヤを対象としていますが、デジタル・オーディオ用 DAC においても主要ダイナミック特性のテストには全く同じ条件でテストするのが一般的です。EIAJ 規格ではテスト用 20k LPF の要求特性を次のように定めています。

通過帯域幅：4Hz - 20kHz

遮断特性：60 dB 以上、24.1kHz にて

すなわち、全てのダイナミック特性テストにおいては、上記条件を満足するテスト用 LPF を用いなくてはなりません。また、ダイナミック・レンジと S/N 比テストに用いる聴感補正フィルタに関しては、IEC publ.651 に規定された補正曲線 A 特性のものと規定されており、一般的には IHF - A、A - weighted 等で表示されています。

THD + N テスト

THD + N テストのブロック図を図 11 に示します。DAC 出力テスト信号は、テスト用 20k LPF で帯域外スペクトラムを十分抑圧してからオーディオ THD アナライザへ送られます。

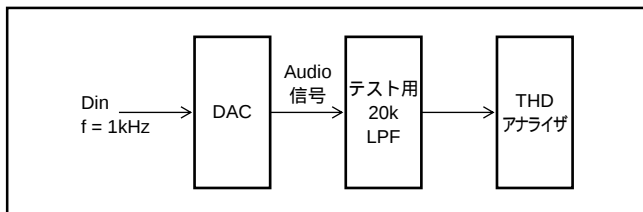


図 11. THD + N テスト・ブロック

テスト信号としては、 $f = 1kHz$ 、0dB が標準ですが、対レベル、対信号周波数のパラメータでのテストも可能です。ここで、例えば THD アナライザに LPF が内蔵されている場合は、その内蔵 LPF の特性が前述の要求特性を満足しているかどうかの確認が必要です。LPF によっては要求性能を満足しないものもあり、この場合は外部にテスト用 LPF が必要です。

ダイナミック・レンジ・テスト

ダイナミック・レンジのテスト・ブロック図を図 12 に示します。

DAC 出力(入力レベル)は $-60dB$ に設定し、この時の THD + N 特性をテスト用 20k LPF および聴感補正 A フィルタを介し、THD アナライザへの供給レベルを十分にするため 60dB のアンプを併用しています。ここで測定された THD + N 値を AdB とすれば、ダイナミック・レンジ (D・R) は

$$D \cdot R = 60 + A \text{ (dB)}$$

と表わすことができます。

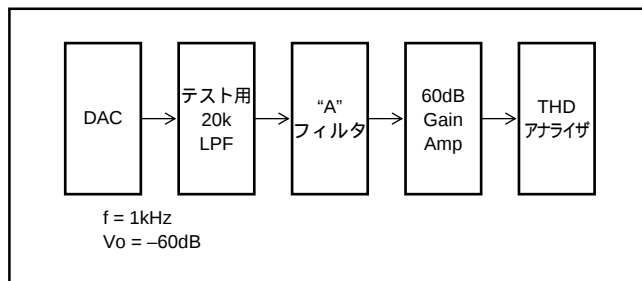


図 12. ダイナミック・レンジテスト・ブロック

S/N 比テスト

S/N 比テストのブロック図を図 13 に示します。S/N 比テストでは単純に 0 dB 信号レベル A と無信号時ノイズ・レベル B の差を測定することによって、

$$S/N \text{ 比} = A - B \text{ (dB)}$$

として測定できます。

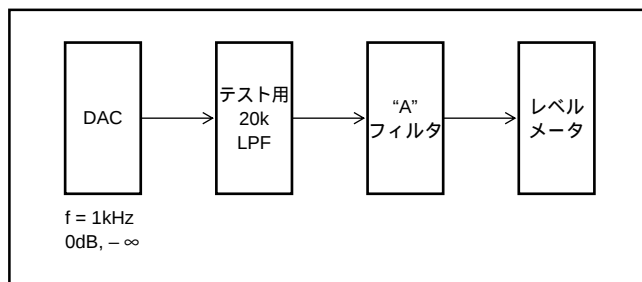


図 13. S/N 比テスト・ブロック

実アプリケーション・セットへの考察

実際のアプリケーション・セットにおいては、DAC出力に何らかの Post LPF を接続し Audio 出力とするのが一般的です。この Post LPF の特性、構成に関しては、帯域外ノイズをある程度抑圧する簡単なフィルタで構成するのがほとんどです。

これは、実際のアプリケーション・セットにおいては帯域外ノイズは人間の聴感には反応しないのと、実際に接続される後段のアンプ等の特性に影響を与えるレベル以下であることによります。図14に実アプリケーション・セットと測定系のブロック図を示します。図15に現在一般的に用いられている Post LPF の構成と特性を示します。

ここでは、カット・オフ周波数 $f_c = 24\text{kHz}$ として示しています。例えば、2次のアクティブLPFを用いても減衰特性は 48kHz で -18dB であり、正しい THD + N テストにはテスト用 20kHz LPF が必要です。すなわち、実アプリケーション・セットでの Post LPF 条件とテスト時の測定用 20kHz LPF は区別しなければなりません。

DAC 出力スペクトラムの実測例

デジタル・フィルタ内蔵 $\Delta\Sigma$ 型 DAC の出力スペクトラムの実測例を図16に示します。

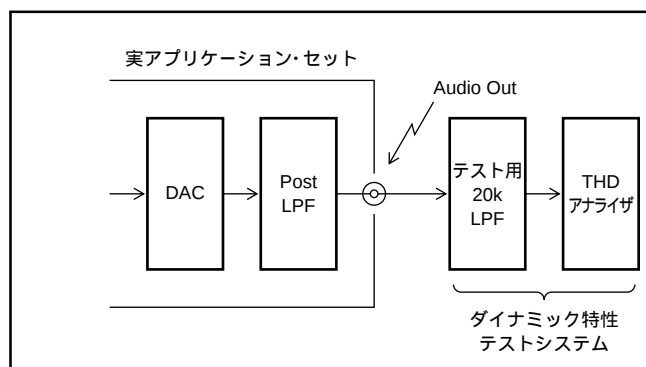


図14. 実セットと測定系

測定に用いた DAC は PCM1717 で、D・F の ATT レベルは -35dB 、 $f_s = 44.1\text{kHz}$ 動作によるものです。帯域外スペクトラムはノイズ・シェーピングによるものと、D・F の再量子化サンプリングによるものとをそれぞれ確認することができます。

Post LPF、テスト条件差による THD + N テスト実測例

ここでは、PCM1717 の THD + N 特性が、測定器、テスト用 20kHz LPF の有無、Post LPF の有無によってどう変化するか実測した例を示します。また、測定にはパー・ブラウンのデモボード DEM-DAI1717 (DAC 直接出力端子と 2 次 LPF 出力端子有り) を用いています。

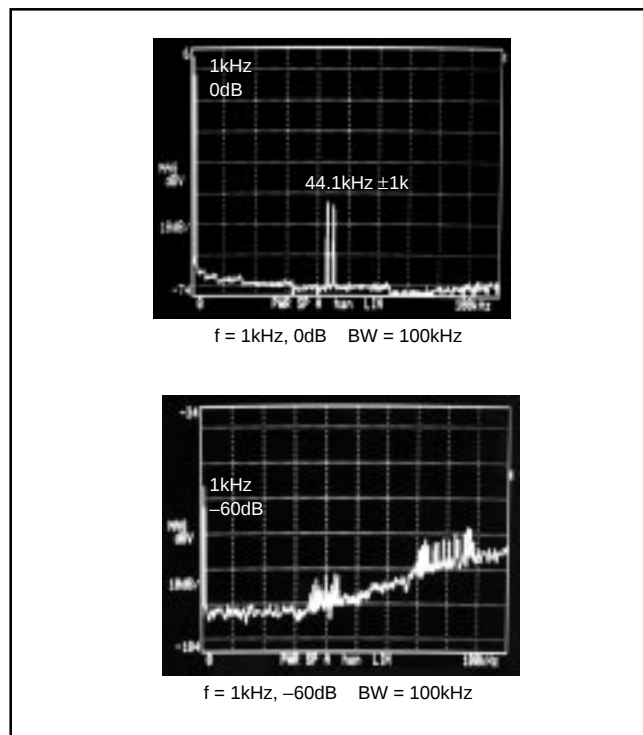


図16. PCM1717 出力スペクトラム測定例

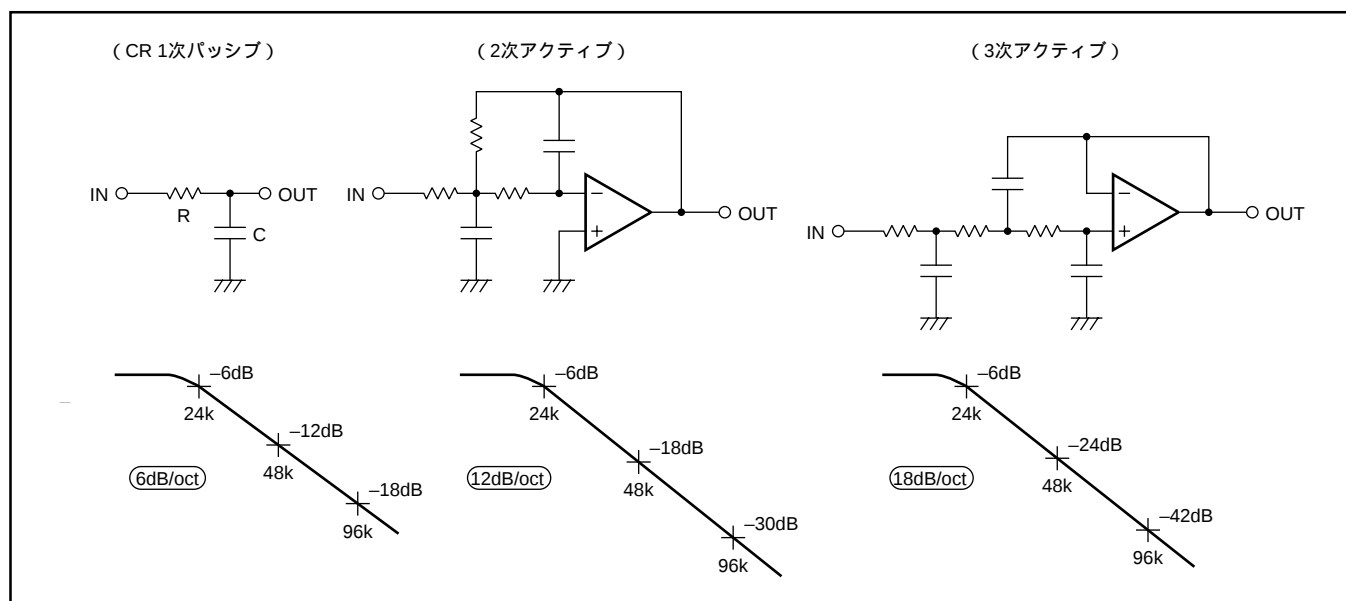


図15. 一般的な Post LPF の例

Audio Precision, 'system-one' による測定

'system-one' には内蔵フィルタとして22k、30k、80k等のカット・オフ特性を持つLPFが用意されていますが、これらのLPFは遮断特性が急峻でないで、テスト用20k LPFを用いないと正しいTHD + N測定はできません。図17と図18に測定例を示します。

シバソク #725による測定

#725においても内蔵の30k LPFのみでは不十分で、テスト用20k LPFが必要です。図19にTHDアナライザ波形の測定例を示します。

パー・ブラウンPCM171Xシリーズでの特長

パー・ブラウンのPCM171Xシリーズはそのマルチレベル $\Delta\Sigma$ アーキテクチャにおいて、特に帯域内ノイズの抑圧に重点をおい

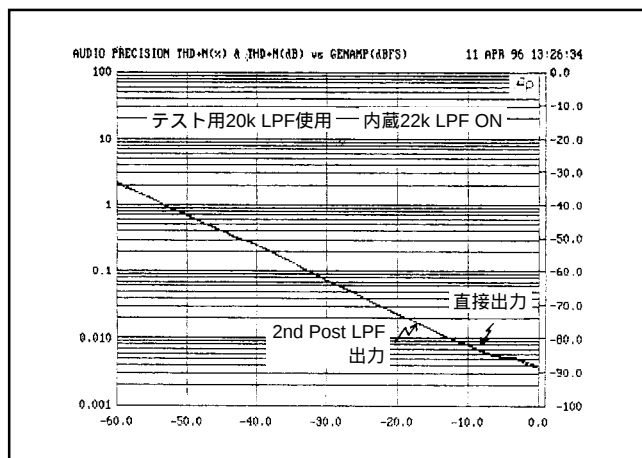


図17. THD + N実測例(1) (ほぼ正確にTHD + N値として測定)

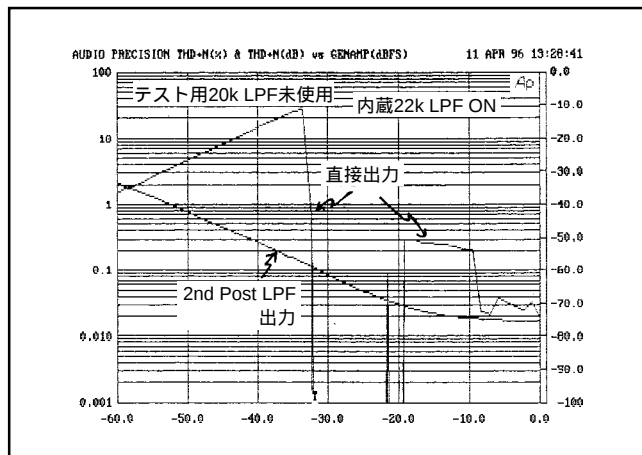
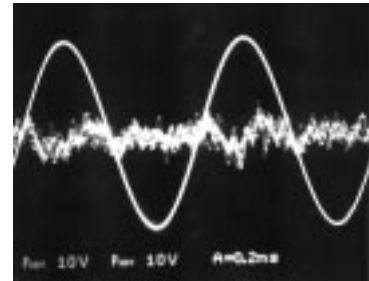


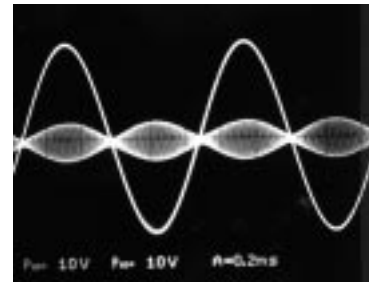
図18. THD + N実測例(2) (帯域外ノイズの影響で正確な測定ができない)

ているため、その分帯域外スペクトラム量が他社のDACに比べて大きくなっています。これは、別の言い方をすれば、帯域内の聴感、特性は他社よりも優れていることを意味しています。

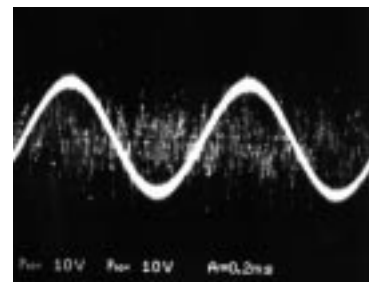
20k LPF以外の条件で、もし、パー・ブラウンのPCM171Xシリーズが他社のものより悪い評価となった場合、今一度見直しがが必要です。この点、正しいダイナミック特性評価の意味とテスト方法の理解をお願いします。



テスト用20k LPF使用(THD + Nとして測定)
内蔵30k LPF ON
f = 1kHz, 0dB
THD + N = 0.003%



テスト用20k LPF未使用(エアリングノイズ測定)
内蔵30k LPF ON
2nd Post LPF出力
THD + N = 0.1%



テスト用20k LPF未使用(エアリングノイズ測定)
内蔵30k LPF ON
直接出力
THD + N = 0.8%

図19. THD + N実測例(3)

このアプリケーションノートに記載されている情報は、信頼しうるものと考えておりますが、不正確な情報や記載漏れ等に関して弊社は責任を負うものではありません。情報の使用について弊社は責任を負えませんので、各ユーザーの責任において御使用下さい。価格や仕様は予告なしに変更される場合がありますのでご了承下さい。ここに記載されているいかなる回路についても工業所有権その他の権利またはその実施権を付与したり承諾したりするものではありません。弊社は弊社製品を生命維持に関する機器またはシステムに使用することを承認しまたは保証するものではありません。

日本バー・ブラウン株式会社

<http://www.bbj.co.jp/>

本 社 〒222-0033 横浜市港北区新横浜2-3-12 新横浜スクエアビル ☎ 045-476-7870

大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島6-1-1 新大阪プライムタワー ☎ 06-6305-3287

(AB-104)



万一つながらない場合は、お手数ですが弊社営業部FAX045-476-7889（有料）までご連絡くださるか、あるいはTELにてお問い合わせください。

©BBJ991002K