

PCMデバイスの低サンプリング・レート動作と特性

このアプリケーションノートは、バー・ブラウンのマルチレベル・デルタ・シグマ方式PCMデバイス(ADC、DAC、CODEC)において規定されている標準的なサンプリング・レート外での動作と特性について具体的なデータとともに示したものです。

概要

一般的なデジタル・オーディオ・アプリケーション、CD-DA、DAT、MD、BS放送等における標準的なサンプリング・レート(以下、 f_s と称す)は周知の通り、32kHz、44.1kHz、48kHz、さらにDVDでは96kHzがそれぞれ標準として定められています。デジタル・オーディオ用に設計されたADC、DAC、CODEC等のコンバータICの動作と特性は、標準的な f_s すなわち $f_s = 32\text{kHz}$ から96kHzにおいて規定されており、これらのアプリケーションでは問題なく動作します。

一方、最近ではPCモデム、TV会議システム等通信分野でのアプリケーションが多くあり、これらのアプリケーションではデジタル・オーディオでの標準的 f_s に比べ $f_s = 8\text{kHz}$ から16kHzといった、より低い f_s 動作条件となります。また、これらのアプリケーションでも80dBから90dBのダイナミック・レンジが求められるケースがあり、デジタル・オーディオ用のPCMデバイスがこれらに適用され始めています。

前述の通り、これらのPCMデバイスでの f_s 条件はデータシート上一般的に $f_s = 32\text{kHz}$ を下限として規定されているため、このアプリケーションノートでは $f_s = 8\text{kHz}$ 、16kHz条件での動作と特性についてその理論的背景と実際のデータを基に詳しく解説しています。

したがって、このアプリケーションノートからその動作を正しく理解することにより、これらの通信関連アプリケーションでPCMデバイスをハイパフォーマンスで用いることができます。

低 f_s 条件における理論ダイナミック特性

デルタ・シグマ方式における量子化ノイズの抑圧レベル、すなわちダイナミック・レンジ等のダイナミック特性は、理論的にそのデルタ・シグマ変調器の構成(次数)とオーバー・サンプリング・レート(信号周波数帯域との比、一般

的には $48f_s$ から $96f_s$ 程度)で決定されます。

一般的なデジタル・オーディオでは標準信号周波数を1kHz、最大信号周波数を20kHz、 $f_s = 44.1\text{kHz}$ にそれぞれ規定しており、デルタ・シグマ部のオーバー・サンプリング比は各PCMモデルごとに一定になっています。ここで、 f_s を8kHz、あるいは16kHzに変化させた場合でも、動作クロック周波数の値は当然変わりますが、デルタ・シグマ部の構成とオーバー・サンプリング比は変わらないので、 f_s に比例した信号帯域でのダイナミック特性は理論的には変化しません。例えば、 $f_s = 48\text{kHz}$ 、信号周波数1kHzでのダイナミック・レンジを90dBとすれば、 $f_s = 8\text{kHz}$ では、 $(8\text{K}/48\text{K} = 1/6)$ から信号周波数 $(1\text{K}/6 = 167\text{Hz})$ でのダイナミック・レンジも90dBが理論的に得られます。

実際のアプリケーションにおいては、ナイキストの定理に応じた帯域制限が必要になりますが、基本的なダイナミック特性は前述の条件から f_s が低くても変わりません。

f_s の下限条件

PCMデバイスでは、そのデジタル部、特にオーバー・サンプリング・デジタルフィルタ部にダイナミック・ロジック回路方式を用いており、この回路の動作速度制限からPCMデバイスの動作 f_s の限度が決定されます。図1にダイナミック・ロジック回路の等価回路を示します。メモリおよび伝送機能は動作クロックで行われ、寄生容量は伝送データを保持します。この回路はダイナミック・レジスタとして知られています。

図2にこのダイナミック・レジスタのデバイスレベルでの等価回路を示します。Nch、Pchの各MOSトランジスタは、その動作状態がOFFの場合でもリーク電流があり、チャージ電圧はこのリーク電流により放電されます。充放電時間は動作クロックで決定されますが、規定された f_s 条件での動作クロックは10MHzオーダー(例えば $256f_s$ of $f_s = 48\text{K}$ は12.288MHz)であり、充放電間隔は非常に早く、このダイナミック・レジスタの機能に特に問題はありません。

ここで、 f_s が低くなり動作クロックが低くなると、充放電時間が長くなり、寄生容量におけるデータ保持機能が失われることになります。この場合、このダイナミック・レジスタ回路は機能しないため、DAC、ADC、CODECとして基本的に動作しなくなります。

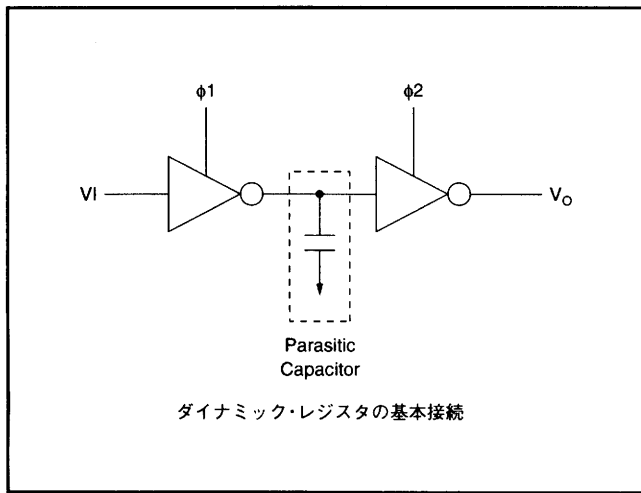


図1. ダイナミック・ロジック回路の等価回路

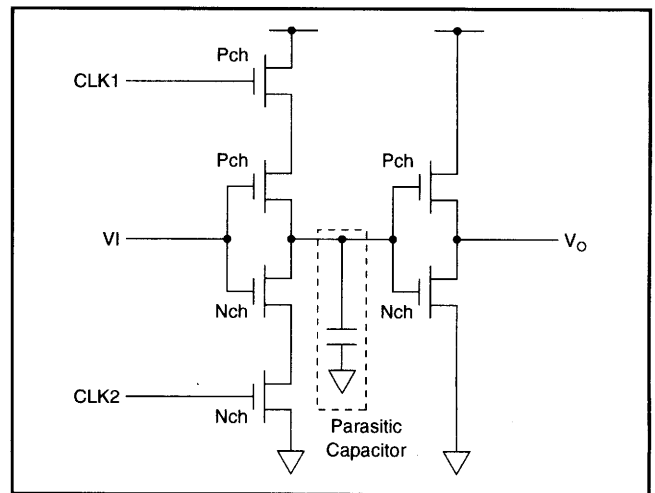


図2. ダイナミック・レジスタのデバイスレベルでの等価回路

この最低動作条件を検証して、各モデルごとにその最低 f_s 条件をまとめたものを表Iに示します。表Iにある通り、ほとんどのPCMモデルは $f_s = 4\text{kHz}$ での動作が可能です。

低 f_s 動作におけるフィルタリングとダイナミック特性

PCMデバイス内蔵のデジタルフィルタの周波数特性(Pass Band, Stop Band, Attenuation)は、その動作理論から f_s を正規化単位として決定されているため、 f_s の変化によりその周波数も f_s との比で追従変化します。例えば、 $f_s = 48\text{kHz}$ でのストップバンドが $0.583f_s$ であれば、その周波数は $48\text{kHz} \times 0.583 = 27.984\text{kHz}$ ですが、ここで $f_s = 16\text{kHz}$ とするとストップバンドの周波数は $16\text{kHz} \times 0.583 = 9.328\text{kHz}$ になります。すなわち、内蔵デジタルフィルタの機能(効果)は低 f_s 条件下においても有効であると言えます。

一方、アナログフィルタ部(ADCにおけるアンチ・エイリアスフィルタ、DACにおけるポスト・ローパスフィルタ)の周波数特性は、固定されたCR定数で決定されているため、 f_s 条件が変化してもアナログフィルタの周波数特性は固定されたまま変化しません。また、これらのアナログフィルタは、標準的なデジタル・オーディオ用に設定されていることから、カットオフ周波数は 100kHz 程度になっており、特に低 f_s 動作ではアナログフィルタの効果は全く期待できないと言えます。図3にPCM3000/3001(PCM3002/3003/3006、PCM1800もほぼ同様)のADC部アンチ・エイリアス・アナログフィルタの周波数特性を示します。図4にPCM3000/3001(PCM3002/3003/3006、全PCM DACもほぼ同様)のDAC部ポスト・ローパス・アナログフィルタの周波数特性を示します。これら図3および図4からわかる通り、 $f_s = 8\text{kHz}$ 、 16kHz 等の低 f_s 動作では、サンプリング・スペクトルに対するフィルタ効果は全くありません。図5は同一モデルのDAC部デジタルフィルタ周波数特性であり、この周波数特性からサンプリング・スペクトルレベルをある程度除去することができます。 $f_s = 8\text{kHz}$ 、 16kHz 等での実アプリケーションにおいて、A/DあるいはD/A変換されたデータは当然サンプリング周波数 f_s のスペクトルを含んでおり、この f_s 周波数が可聴帯域内にあることから($f_s = 32\text{kHz}$ から 96kHz は可聴帯域外)、特にD/A時にはこの f_s 成分を外付フィルタで除去しなければなりません。

モデル	動作周波数		備考
	最小	最大	
PCM1716/28	4kHz	96kHz	PLLは動作しません
PCM1717/18/19	4kHz	48kHz	
PCM1720	4kHz	96kHz	
PCM1723/27	16kHz	96kHz	
PCM1725/33	4kHz	96kHz	
PCM1704	N/A	$96\text{kHz} \times 8$	
PCM1800	4kHz	48kHz	
PCM3000/1	4kHz	48kHz	
PCM3002/3/6	4kHz	48kHz	

注：(1)この周波数範囲内でのAC特性を保証するものではありません。(2)これより高いサンプリング・レートでの動作は、内部ロジック・タイミングにより制限されます。(3)これより低いサンプリング・レートはダイナミック・レジスタにより制限されます。

表I. 各モデルにおける最低 f_s 条件

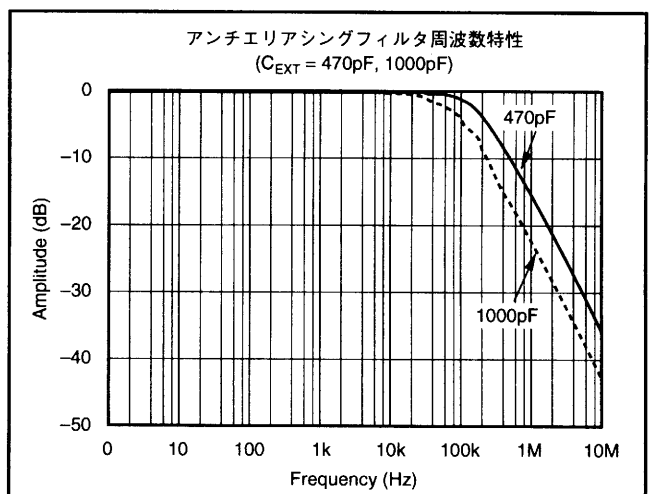


図3. PCM3000/3001のADC部アンチ・エイリアシング・フィルタ周波数特性

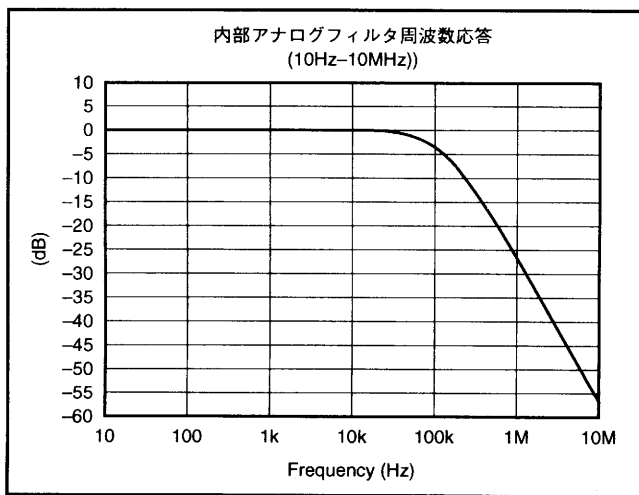


図4. PCM3000/3001のDAC部ポスト・ローパス・アナログフィルタ周波数特性

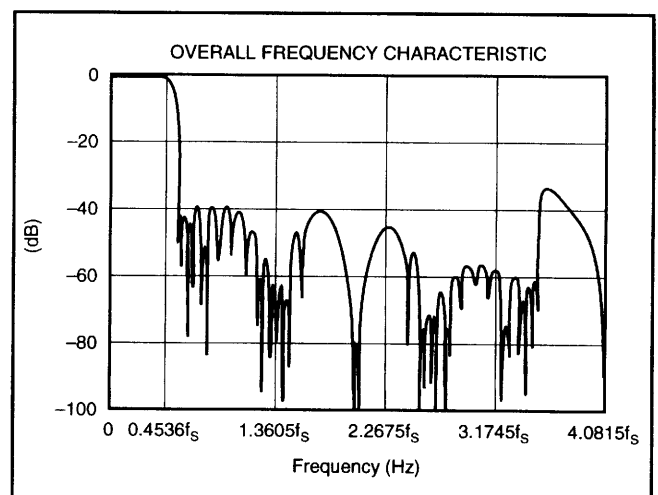


図5. PCM3000/3001のDAC部デジタルフィルタ周波数特性

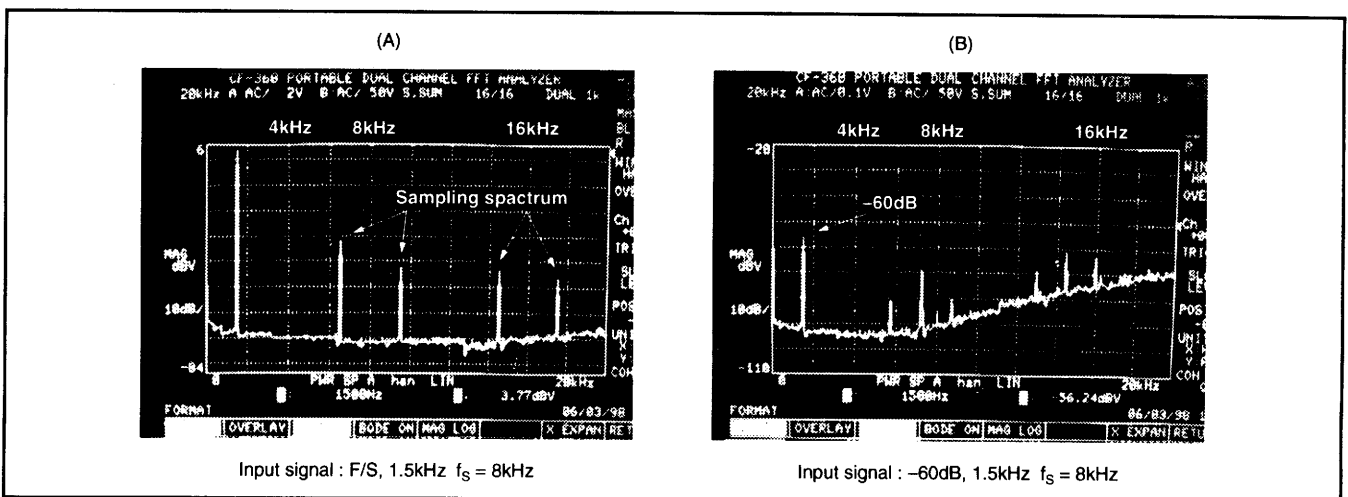


図6. PCM1717での $f_s = 8\text{kHz}$ 、信号周波数1.5kHzにおける出力スペクトルの実測データ (A: 0dB出力、B: -60dB出力)

すなわち、低 f_s 条件で最も重要な課題は、DAC出力に対するフィルタリングとなります。図6に、PCM1717(他のDACモデル、CODECのDAC部もほぼ同様)での $f_s = 8\text{kHz}$ 、信号周波数1.5kHzにおける出力スペクトルの実測データ (A: 0dB出力、B: -60dB出力)を示します。図6から明らかなように、 f_s の8kHz $\pm 1.5\text{kHz}$ 、16kHz $\pm 1.5\text{kHz}$ にそれぞれサンプリング・スペクトルが分布しています。これらの成分はデジタルフィルタで抑圧されているものの、除去しきれないスペクトルで(デジタルフィルタの減衰は35dB)、完全に可聴帯域内に存在しています。このスペクトルは外部ローパスフィルタで除去しなければなりません。図7は全く同じ条件でのPCM1716の出力スペクトルの実測データです。PCM1716の場合、82dBのデジタルフィルタでの減衰特性を有しているため、サンプリングスペクトルはほとんど見られません。図8はPCM1800のA/Dデータをマルチビット型DAC PCM1702でD/A変換したFFTデータで、 $f_s = 8\text{kHz}$ 、信号レベルは0dB(F/S)です。図9は同じ条件で信号レベルを-60dBとしたものです。サンプリング・スペクトルのレベルは-90dB以下となっています。

図8および図9より、A/D変換データそのものはA/D側のデシメーション・フィルタによりサンプリング・スペクトルが除去され、またマルチビット型DACでのD/A再生では、デルタ・シグマ型DACでの再生で見られる帯域外ノイズの上昇傾向もありません。

低 f_s 動作でのダイナミック特性実測データ

THD +N特性に代表されるダイナミック特性の正しい評価、テストにおいては、 f_s 条件に応じた完全な帯域制限が極めて重要になります。特に $f_s = 8\text{kHz}$ 、16kHzの条件では、一般的なオーディオ測定器に内蔵されている20kHz/30kHzのローパスフィルタは何らの効果もありませんので注意しなければなりません。

THD +N測定での評価目的はデバイスの非直線性に起因するTotal Harmonic Distortion(全高調波歪み)の測定で、通常基本波信号の高調波は2次から7次程度に-90dB程度のレベルで分布しています。したがって、これらの高調波を測定する場合、図6で示されているような-35dBレベルのサンプリング・スペクトルを帯域制限フィルタにより-90dB以上除去させないと、“THD +Nレベル<帯域外スペクトルレベル”の関係となりTHD成分の測定では

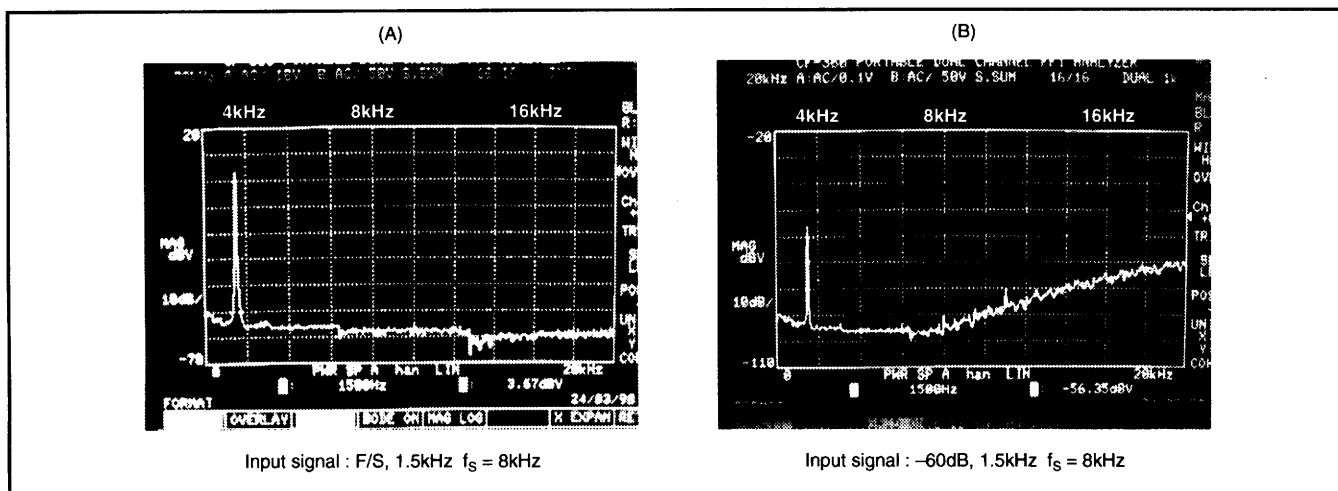


図7. PCM1716での $f_s = 8\text{kHz}$ 、信号周波数1.5kHzにおける出力スペクトルの実測データ (A : 0dB出力、B : -60dB出力)

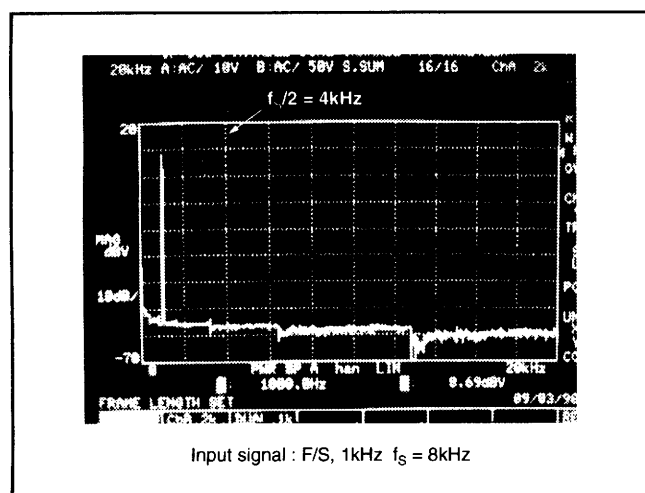


図8. PCM1800のA/Dデータをマルチビット型DAC PCM1702でD/A変換したFFTデータ

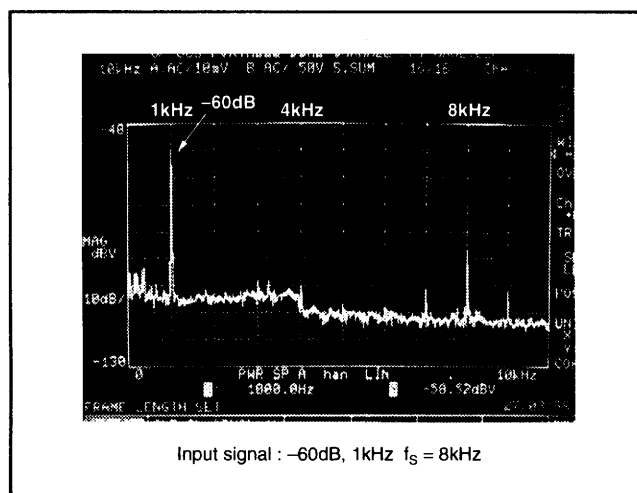


図9. PCM1800のA/Dデータをマルチビット型DAC PCM1702でD/A変換したFFTデータ (信号レベル-60dB)

なく、帯域外スペクトル量の測定になってしまいます。

すなわち、正しい評価、テストには急峻なロールオフ特性をもつ測定用ローパスフィルタによる帯域制限が絶対に必要です。

図10に2種類の測定用ローパスフィルタによるPCM1717、 $f_s = 8\text{kHz}$ 条件でのTHD+N特性実測データを示します。ナイキストの定理に基づき測定用ローパスフィルタにより4kHzで帯域制限を完全にした場合、0dB(F/S)時のTHD+Nで-90dB、-60dB時のTHD+Nで-38dB(ダイナミックレンジ換算98dB)と、標準的な f_s 動作に比べほとんど特性の変化はなく、優れたダイナミック特性を得ることができます。

このローパスフィルタ特性がカットオフ周波数4.2kHz、3次の場合、0dB時のTHD+Nは-58dB程度であり、このフィルタ条件による差はほとんど帯域外サンプリングスペクトルによって生じています。このデータから、パー・ブラウンのPCMデバイスは標準外の低 f_s 動作においても優れたダイナミック特性を得ることができると言えます。

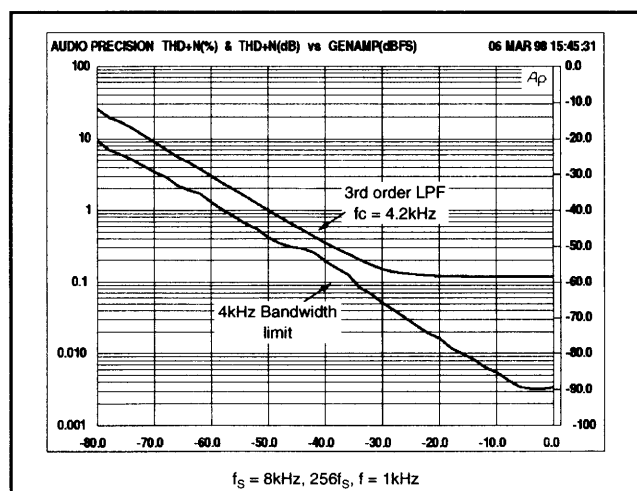


図10. 2種類の測定用ローパスフィルタによるPCM1717、 $f_s = 8\text{kHz}$ 条件でのTHD+N特性実測データ

実アプリケーションにおいての帯域制限は、そのアプリケーションでの条件によって異なり、評価、テストと別に考えなければなりません、ナイキストの定理に基づいた $f_s/2$ の帯域制限用に、何らかのポスト・ローパスフィルタをDAC出力に接続することをお奨めします。

表Ⅱにパー・ブラウンの主要デルタ-シグマ型ADC、DACの $f_s = 8\text{kHz}$ 動作におけるダイナミック特性実測結果をまとめたものを示します。ここでのダイナミック・レンジとS/N比測定はEIAJ法

によるものでAウェイトフィルタを用いています。また、評価テストは全てパー・ブラウンの各モデルの評価用デモボードを用いています。表Ⅱにおいて、PCM3000/3001/3002/3003/3006の各CODECのADC部特性はPCM1800と同等、またDAC部特性はPCM1717と同等です。表Ⅱから明らかなように、 $f_s = 8\text{kHz}$ 動作においても各PCMデバイスの各ダイナミック特性は理想帯域制限条件で非常に優れており、モデム等の通信アプリケーションでの応用が可能です。

モデル	フィルタ	THD +N	ダイナミック・レンジ	SNR
PCM1717	3次	0.0265%	93.5dB	92.5dB
	4kHz帯域幅	0.0028%	99dB	100dB
PCM1716 (16Bits)	3次	0.005%	96.5dB	95dB
	4kHz帯域幅	0.0021%	101dB	103dB
PCM1716 (20Bits)	3次	0.005%	98dB	95dB
	4kHz帯域幅	0.0019%	109dB	103dB
PCM1800 ⁽²⁾	—	0.12% ⁽³⁾	94dB	92dB
	20kHz帯域幅	0.0022%	94dB	92dB

注：(1) $f_s = 8\text{kHz}$ 、 $256f_s$ 、 $f_N = 1\text{kHz}$ 。シバソク社725 400Hz HPF、30kHz LPF ON、20kHz帯域制限。(2)PCM1702のデモボードを使用して測定。(3) SM5842、サンプリング・スペクトル($8f_s$)のデジタルフィルタにより測定。

表Ⅱ．パー・ブラウンの主要デルタ-シグマ型ADC、DACの $f_s = 8\text{kHz}$ 動作におけるダイナミック特性実測結果⁽¹⁾

Summaryと注意点

- ほとんどのPCMモデルは最低 $f_s = 4\text{kHz}$ まで動作可能です。
- 低 f_s 動作での各ダイナミック特性(THD +N、ダイナミック・レンジ、S/N比)は、理想帯域制限下では標準 f_s 時とほぼ同等です。
- DAC出力には何らかのポスト・ローパスフィルタが必要です。フィルタ条件は実際のアプリケーションによって決定されるべきです。
- 低 f_s 条件での動作は設計上での動作限界で、同様にダイナミック特性は標準値データであり保証値ではありません。
- その他の動作条件、電源電圧、温度範囲、付属機能、システム・クロック条件($256f_s$ 、 $384f_s$ 等の関係およびLRCK(f_s)クロックとの動同期関係)等は標準 f_s の場合と変わりません。

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

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 ☎ 06-305-3287

	フリーダイヤル	フリーラインFAX
本社		FAX.0120-068801
大阪		FAX.0120-068805