

## クロックとジッターの話

### USB-DAC の音質向上

はじめて PCM2704 (Burr Brown 製、現在は Texas Instruments) という USB-DAC なるものを使ったときは、データシート (集積回路などの詳細な仕様書) やネット上で見つけた製作例を参考に、とりあえず動作させることで満足していた。そのあとのアンプやスピーカーを改善することで、いちおう実用に耐える、いわゆる PC オーディオへの導入ができただけでも十分に価値のあるものであった。ところが、人間の欲にはきりが無い。16 ビットノンオーバーサンプリング DAC と比べて、音質の格差がどうしても気になってくる。同じ 16 ビットでありながら、解像度や定位感、音の芯を再現する力などの点で、両者の音質の違いは歴然としている。ではどうすれば USB-DAC の音質を改善できるか？ 音質向上のステップとしては次のような点が挙げられ、いずれも実際にそれなりの効果があることは周知のとおりである。



### セルフパワー方式

USB-DAC を動作させるためには、どこかから電源を供給しなければならない。簡易な USB-DAC ではパソコンから USB ケーブルを経由して電源を供給する、いわゆるバスパワー (bus-power) という方式をとるものが多い。パソコンの電源系統は、スイッチング電源そのものの雑音をはじめ、CPU を高速で動かしたりハードディスクを回したりしているため、さまざまなノイズが入り乱れている。あるノートパソコンでは、マウスを動かすだけでイヤフォン端子からノイズが聴こえた。USB はそもそも音響機器をつなぐことを想定して作られたわけではなく、プリンタやハードディスクなどの周辺機器と通信したり、スキャナやマウス、USB メモリなどのデジタル機器に電源供給するために設計されており、それらが正常に動作すればよかった。USB につなげた周辺機器の消費電流は、100mA (または 500mA) 以下でなければならないという規格がある。こうした制約を取り除くため、USB-DAC 自体でクリーンな電源をもつセルフパワー (self-power) という方式に変更する。一般に、バスパワーよりもセルフパワーにしたほうが透明感のある音質で、ジリジリというノイズも少ない。PCM2704 も、バスパワーとセルフパワーの両方に対応している。

バスパワーの場合は USB アイソレータというものを併用し、パソコン側と周辺機器側を電氣的に切り離すことも、ノイズ低減には有効である。その際、USB アイソレータにはクリーンな電源を供給する。

### 外付け DAC の導入

USB-DAC の内部には、当然ながらデジタルをアナログに変換する D/A コンバータ (DAC) が組み込まれており、たとえば PCM2704 にもアナログ出力が付いていて、ヘッドフォンを直接つないで音楽を楽しむことができる。また、このヘッドフォン出力をアンプにつなげば、スピーカーから聴くこともできる。ただ、すでに述べたとおり、その音質は本格的な DAC に比べ、あくまでも廉価版という位置づけは否定できない。そこで、PCM2704 内部の DAC は使わず、外付け DAC を用意し、その間は S/PDIF

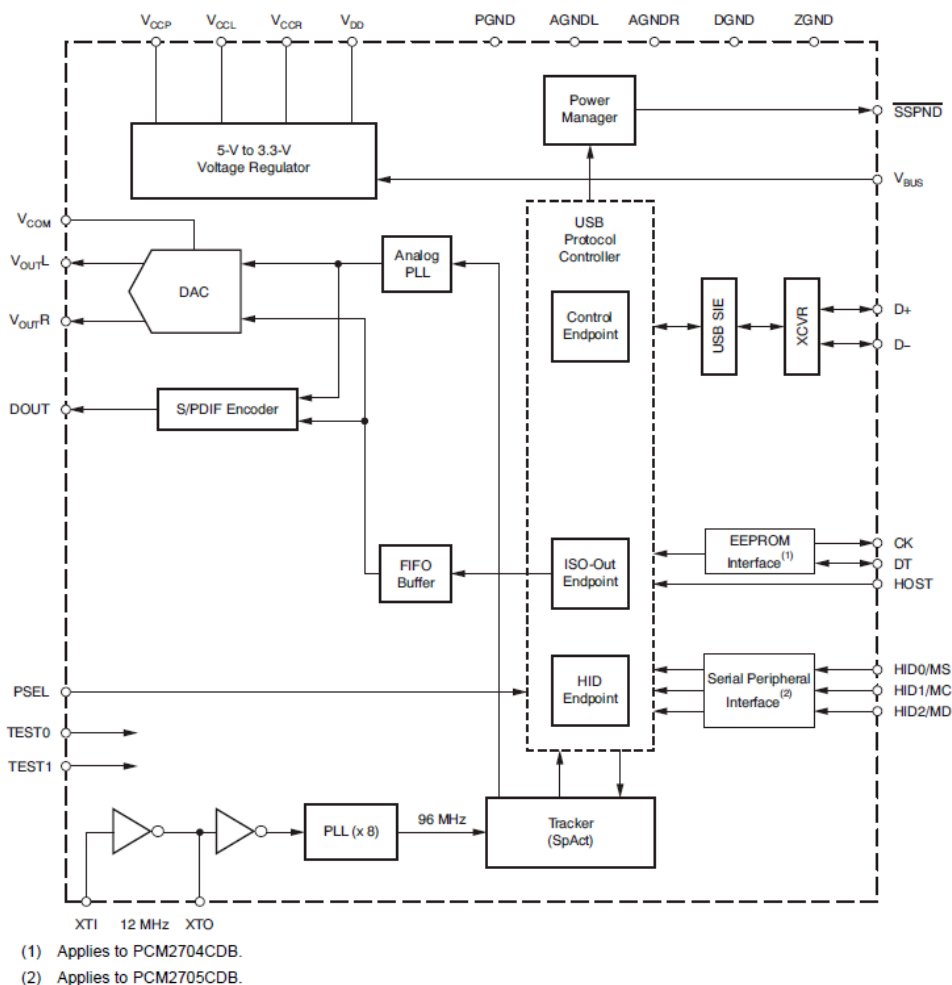
(エス・ピー・ディー・アイ・エフ) という規格のデジタル伝送で、同軸ケーブルまたは光ファイバーによってつなげる。PCM2704/5は16ビット 32 kHz, 44.1 kHz, 48 kHzのS/PDIFに対応している。つまり、PCM2704/5はUSBからS/PDIFへの変換器としてのみはたらく。上位モデルのPCM2706/7では、さらにI<sup>2</sup>S(アイ・スクウェア・エス)にも対応し、TDA1543をはじめほとんどのDACチップに直接つなぐことができるようになった。I<sup>2</sup>SモードのPCM2706/7からは、256fsのシステムクロックも出ているので、256倍すなわち24ビットのデジタルフィルタにも対応している。もちろん、USBからI<sup>2</sup>Sへの変換をしてくれ、16ビットノンオーバーサンプリングDACをつなぐなら、PCM2706/7が適材であり、役不足はない。

## USB-DAC 動作環境の向上

USB-DAC各部のクオリティを吟味し、全体として動作環境の向上をはかるのが、音質向上にとっても有効な手段である。たとえば、よりクリーンで雑音の少ない電源にするため、スイッチング方式のAC-DCアダプタや3端子レギュレータはやめたほうがよい。ちなみに、バッテリーでUSB-DACを動作をさせたら、ジリジリというノイズはうそのように静かになった。バッテリーは理想かもしれないが、充電が必要など扱いがめんどうだから、電灯線からとれるトランス式で、できるだけ静かな電源をつく

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

PCM2704C/PCM2705C



るほうがよいだろう。その際、安定化電源はかならずしも複雑な回路ほど優れているわけではなく、却ってノイズが増える場合がある。何事も、適材適所を心得るほうがよい。ここまでは、自作派の間でも

よく知られた音質改善のステップであり、誰もが考えつくことだろう。

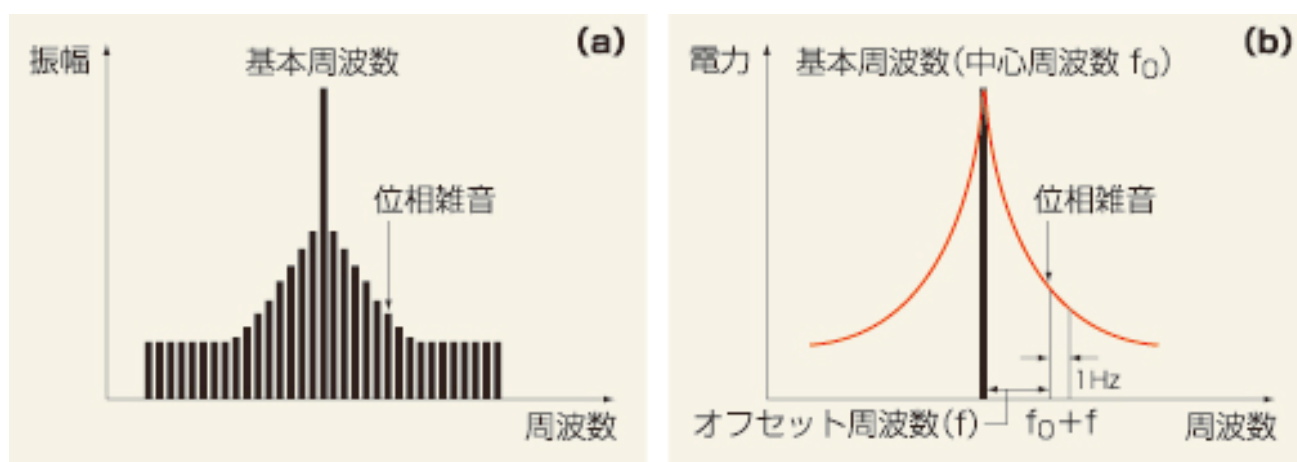
さて、その次に重要なのは何か？ 改善すべき重要な点は、もっとほかにはないだろうか？ PCM270x のデータシートを眺めていて、ひとつ気になることがあった。それは、PCM270x 自体が 12MHz の基準クロックを必要とすることである。しかも PLL の基準信号として 8 通倍の 96MHz を生成していて、高周波的にかなりきわどいことをやっている。これは音質に影響するに違いないと直観した。

## クロックとジッター

基準クロックが必要だということは、パソコンから USB 経由で次々にデジタル伝送されてくるオーディオ信号は、いったん USB-DAC のなかに少しだけ蓄えられ、基準クロックに同期して順番に読み出されるということだ。いわば河川上流からの水を一時的に貯めるダムのようなもので、そのようなはたらきをするメモリをバッファという。FIFO (First In First Out) というのは、「はじめに入れたものから順番に出す」という意味である。基準クロックはそのデータを取り出すタイミングを決める重要なもので、つねに一定のペースでないと具合が悪い。CD フォーマットの場合のサンプリング周波数は 44.1kHz であるが、1/44100 秒に 1 回のペースでデータを再現しているのだから、これが狂うとそのままピッチが変わってしまう。その変化が数 Hz 以上あったら、明らかに音程が変わったとして認識できるが、それ未満の微小なゆらぎは音の「にじみ」や「濁り」として捉えられ、ぼわっとしてピッチが不明瞭になる。このような、デジタル信号の時間的なゆらぎをジッター (jitter) という。デジタルオーディオ機器は音の波形を再現する上で正確さが要求されるから、ジッターはいわば不整脈であり、不規則な時間のゆらぎである。



水晶振動子の代わりに温度補償 TCXO などの外部発振器を取り付けている製作例もあるが、業務用の通信機器や測定器の較正ではないので、周波数の確度や温度変化に対する安定性など、比較的周期の長い狂いは、さほど重要ではない。それよりも  $\mu$  (マイクロ/ $10^{-6}$ ) 秒、p (ピコ/ $10^{-12}$ ) 秒レベルのゆらぎが、音質に影響してくる。水晶発振器は、本来発振すべき周波数以外の周波数成分も出力しており、文献 1 によると「基本周波数の近辺にある他の周波数の裾が見られます。これは、ランダムな信号による位相変調、つまり雑音源が発振器を変調することによって生じるものです」とある。そのようにして発生した信号は、ごくわずかな周期が早いか遅いかしているため位相がずれているので、位相雑音 (phase noise) という。位相雑音とジッターの関係については、文献 2 に詳しい。

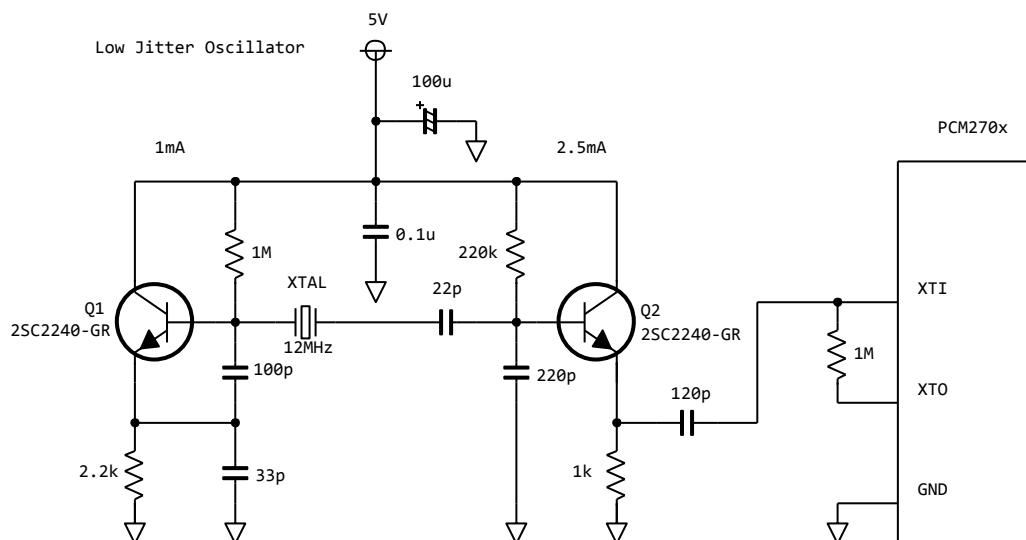


また、その周波数成分 (スペクトル) の分布は、 $1/f$  ゆらぎになっているという。基本周波数に近い

成分ほど発生頻度が高く、遠い成分はごくまれに発生するという意味である。1/f ゆらぎの雑音源はフリッカー雑音（ピンクノイズともいう）という。フリッカー（flicker）とはもともと、光のちらつきや炎のゆらぎ、木の葉のそよぎを意味しており、半導体でも抵抗でも、程度の差こそあれほとんどすべての電子素子には直流電流に伴って 1/f のゆらぎがある（文献 4）。その雑音によって位相変調されるならば、雑音源を特定して低減すればよい。ジッターの要因はほかにもあろうが、クロックの発生源から根本的にジッターを減らす方法は、これしかない。

## 外部クロック発振器の試作

PCM270x の XTI と XTO のピンに水晶振動子をつなぎ、内部の CMOS インバータを使って正帰還により発振する場合、どうしても内部雑音などの影響を受けやすい。さらに根本的には、CMOS インバータで矩形波を発生させると、立ち上がりのパルス性ノイズ、オーバーシュートやアンダーシュート（振動）が出やすく、ゼロクロス点の時間ゆらぎが多い。そこで 1/f 雑音の少ない低雑音トランジスタ 2 個で組んだ外部水晶発振回路（文献 3 を参考に定数変更）で 12MHz の安定した正弦波を発生させ、交流的に XTI ピンにつないでみた。抵抗器 1MΩ はそのままとする。周波数の確度や温度変化に対する安定性については、とくに考慮していない。といっても、水晶なので偏差 50ppm 程度は出ているはずだ。



実際に試作して聴いてみると、結果は予想どおりだった。ひとつひとつの音が明瞭になり、響きが美しく再現される。チェンバロやリュートのはじく音がいちばんわかりやすいが、音のにじみや濁りが少なく、芯がある。音階や和声のハーモニー感も明瞭で、音楽的な響きがしっかりしてくる。大編成のオーケストラで、さまざまな楽器の音色が団子にならない。内部 DAC による評価なのでデジタルフィルタの音はするが、クロックの外部化・低雑音化は顕著な効果があることがわかった。S/PDIF や I<sup>2</sup>S に変換した場合でも、PCM270x からのリクロック信号に同期して D/A 変換されるので、音質に影響する。

文献 1：セイコーエプソン 水晶デバイス基礎講座 [http://eetimes.jp/ee/articles/1111/07/news003\\_2.html](http://eetimes.jp/ee/articles/1111/07/news003_2.html)

文献 2：『トランジスタ技術』2009 年 2/3 月号（CQ 出版社）、「位相雑音とジッターの関係を探る」

文献 3：『定本・発振回路の設計と応用』稲葉保、1993 年（CQ 出版社）179 ページ、無調整トランジスタ水晶発振回路

文献 4：『ゆらぎの世界』武者利光、1980 年（講談社ブルーバックス）

2014.07.22 スパークラー・オーディオ株式会社 塚原和俊