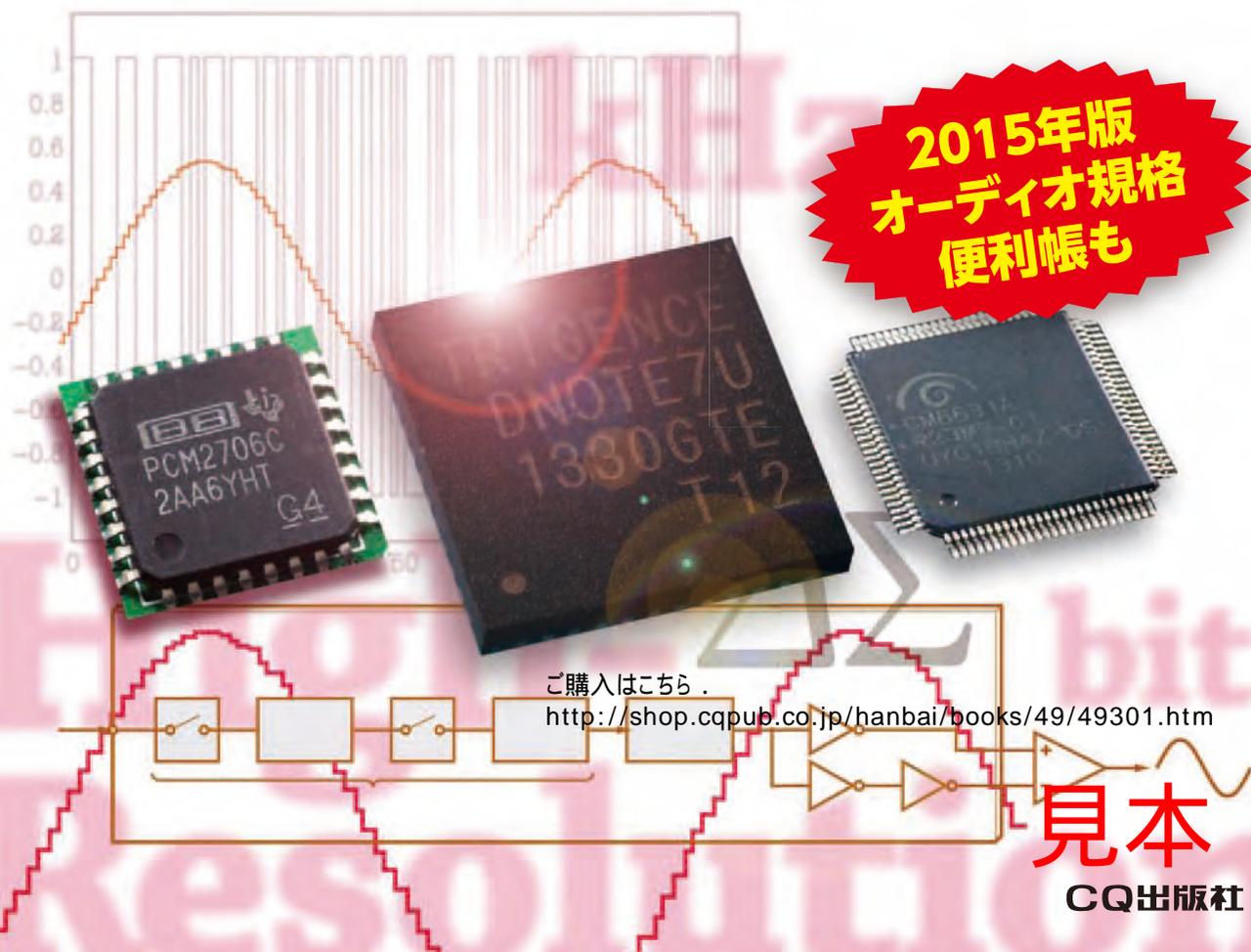


トランジスタ技術 SPECIAL

24ビット D-Aコンバータから低雑音電源まで

ハイレゾ・オーディオの 回路技術と製作の素



Introduction

用語と本書のナビゲーション

ハイレゾ・オーディオ入門

安田 彰 / 編集部

1 音のハイレゾって何？

● CDのサンプリングは、16ビット/44.1 kHz

デジタル・オーディオの先駆けとなったCDですが、発表から既に30年以上が過ぎました。現在はこのCDのサンプリング規格(16ビット/44.1 kHz)を上回るハイレゾ・オーディオ(16ビット以上のビット数/48 kHz以上のサンプリング周波数)と呼ばれる音源を再生し、高音質の音楽を楽しむことができますようになりました(図1)。

本書では、このハイレゾ・オーディオに焦点を当て、使用されるデバイスの種類と特徴や回路技術を解説します。また、マルチ・ビット・デジタル・オーディオ・データを直接再生する最新のスピーカとその回路技術「Dnote」も紹介します。

2 ハイレゾを聴く方法

● ハイレゾ音源の入手法

現在、ハイレゾ音源はさまざまなWebサイトでデータ・ファイル・ダウンロードという形で提供/販売されており、ネット上から入手できるようになりました。本書「Appendix 3 ハイレゾ音源の入手先調査」などを参照してください。入手したデータは、PC上またはUSBやLANを経由し、外付けの専用D-Aコンバータで再生します。詳細は第1部や第2部の記事を参照してください。D-Aコンバータの種類や活用方法について詳しい説明をしています。 (編集部)

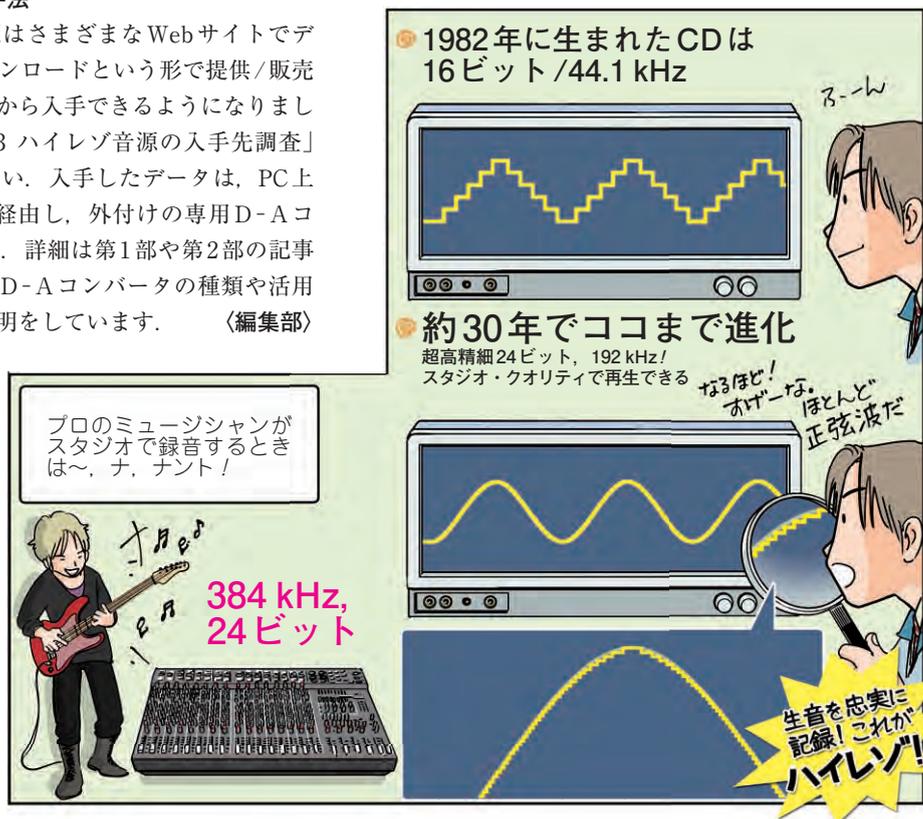
3 ついに音源からスピーカまでデジタルでハイレゾ

● 「Dnote」とは

Dnoteは、Trigence Semiconductor社が法政大学と共同開発した世界初のデジタル・スピーカ・システムです。これまでは、オーディオ・ソースがCDなどのようにデジタル・データであっても、スピーカはアナログ信号で駆動する必要があるため、デジタル・データをD-A変換器でいったんアナログ信号に変換していました。この信号をアンプで増幅し、スピーカを鳴らすのがこれまでのスタイルだったのです。ここで用いるスイッチング・アンプをデジタル・アンプと呼ぶこともあります。その場合でもスピーカをドライブする信号はアナログ信号です。

Dnoteでは、24ビット/192 kHzサンプリングといったハイレゾ信号を、そのクオリティそのままの「0」

図1
音のハイレゾの進化



第1部 最新ハイレゾ・オーディオの基礎と製作



第1章 パソコンや半導体、インターネットの高性能化で様変わり

誕生！ 24ビット・ハイレゾ音源

安田 彰

本章では、デジタル・オーディオの歴史を振り返ります。LPレコードのアナログ時代から、デジタル・オーディオ創世記、CD、DVD、ブルーレイ、SACD、最近のハイレゾ、そして次世代のデジタル・スピーカまでを一気に眺めます。

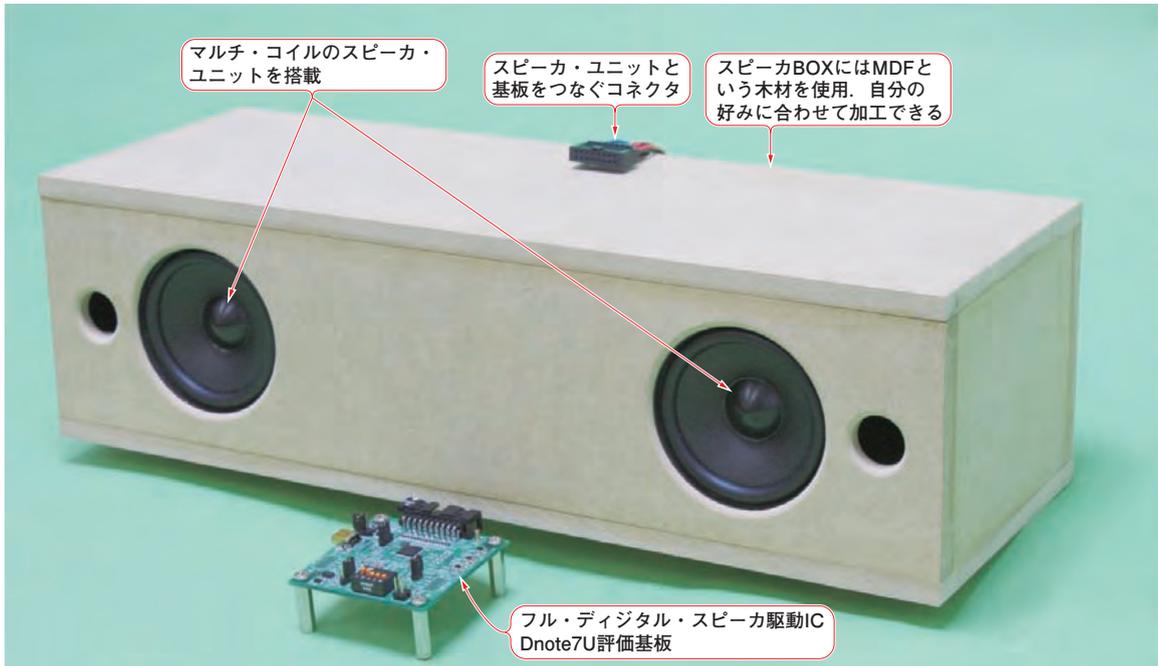


写真1 24ビット、96kHzのデジタル信号で直接スピーカを駆動する信号処理の新技术Dnote(ディーノート、第4章参照) 実験キット「DNSP1-TGKIT」。※キットのスピーカは組み立て式。

携帯型メモリ・プレーヤはコンパクトになり、携帯電話にも音楽再生機能が内蔵されて気軽にデジタル・オーディオを楽しめる時代になりました。

デジタル・オーディオは、CD(Compact Disc)の登場に始まり、DVD(Digital Versatile Disc)、DVDオーディオ、DSD(Direct Stream Digital)規格に対応する音楽メディアSACD(Super Audio CD)が開発され、最近のネットワーク配信へと多様化が進んできました。これに伴い、再生系もCD規格の16ビット、44.1kHzのデータを直接デジタル-アナログ変換し、その後の処理をすべてアナログで行う方式から徐々にデジタル化が進み、現在の24ビット・ハイレゾ規格の信号を高精度に再現

できるオーバーサンプリング技術を用いたデジタル信号処理ベースの方式に変化しました。

最近ではスピーカまでの再生系をデジタル化したフル・デジタル・スピーカ(写真1)も誕生しています。本章では、「デジタル・オーディオ」で使われている技術や部品に注目しながら歴史を振り返ってみます。

CD誕生から30年！デジタル音源の分解能は500倍以上に

- アナログ音源からデジタル音源へ
図1に示すのは、音楽ソースのこれまでの歴史です。デジタル・オーディオの前はアナログ全盛時代で



第2章 CDの1000倍以上！ 滑らかデジタル・オーディオ

24ビット・ハイレゾ音源の誕生とその実力

安田 彰 / 落合 興一郎

本章では、24ビット・ハイレゾを正しく理解するために必要となるサンプリングや量子化といった基礎技術について解説します。これらを使ってハイレゾ音源の波形を眺めてみましょう。そこからハイレゾの本質が見えてきます。

●アナログ信号がデジタル信号に変わるまで
デジタル化ってこれだけのこと！

① サンプリング
アナログ信号を一定のタイミングでマーキングする

一定間隔

② 量子化
マーキングしたアナログ信号を格子状に切り刻む

音量

時間

●ハイレゾ音源
アナログ信号を超キメ細かくサンプリングと量子化して作ったデジタル信号の名称

・CDのデータ
44.1kHz/16ビット

・ハイレゾのデータ
192kHz/24ビット

CDデータ
の1/256(縦)
×1/4(横)

デジタル化ってなんですか？

先ハイ

時間軸方向にスライスした後に音量軸方向に切り刻んでアナログの信号を数値化して表したデータだ！

はじめから超キメ細かいデジタル・データを作ればよかったじゃないですか？

するどいな若者！昔はICの性能が足りなかったから実現できなかったんだよ

今は、大容量のデータを高速処理できるICが開発されて超キメ細かいデジタル・データの生成ができるようになったのだ！

図1 滑らかデジタル・オーディオ信号誕生
24ビット、192kHzの音源はCD音源(16ビット、44.1kHz)より $2^{24-16} \times 192\text{kHz} / 44.1\text{kHz} \approx 1115$ 倍滑らか。

オーディオ機器の購入を検討したり、雑誌を眺めたりすると、24ビット、96kHzやハイレゾといった数字やワードをよく見かけられるようになりました。予備知識がないと、数字が大きいほど高性能なのかも…と感じるかもしれません。でも、ハイレゾと呼ばれる音源(24ビット、96kHzなど)は、従来のCD(16ビット、44.1kHz)と比べて具体的に何が違うのでしょうか？

音質は、再生機器や環境など個人差が大きく、判断基準が明確ではありません。そこでオーディオ・アナライザ(オーディオプレジション社)を使って、24ビット、96kHzと16ビット、44.1kHzの信号波形や周波数スペクトルを実測して比較してみました。

まずは、デジタル音源を生成するA-D変換技術の復習から始めましょう。
(落合興一郎)

デジタル音源が生まれて 耳元に届くまで

普段、何気なく聞いているヘッドホンから聴こえてくる音楽信号はどうやって誕生するのでしょうか？ここではその源流を訪ねてみます。

最近では、インターネットや携帯電話/無線LANなど無線回線の通信速度の向上で、24ビットの高分解能デジタル音源(ハイレゾ音源と呼ばれる)の配信サービスが始まりました。家電量販店でも「ハイレゾ^{high resolution}(ハイ・レゾリューション)」という言葉を目にする

第3章 ICの見分け方とマニアの定番品チェック

24/32ビット・デジタル音源対応 D-A コンバータ IC の研究

西村 康

今日のオーディオ用 D-A コンバータ IC は、産業用の D-A コンバータ IC とは設計思想がかなり異なります。ここでは、技術的変遷に商業的変遷も交えて、その一部を紹介します。



● 1990年代ごろまでの分解能競争の実体

▶ オーディオ専用の D-A コンバータ IC が作られるようになった理由

CD (Compact Disc) の登場以来、オーディオ用 D-A コンバータ IC は日々進化してきました。

初期の CD プレーヤでは、産業用 D-A コンバータを使った製品が作られていましたが、民生用機器としては、これではコストが高く普及の妨げになることから、専用のオーディオ用 D-A コンバータ IC が作られるようになりました。

オーディオ用は、音を聴いてもよく分からない絶対精度を重視する必要があまりなかったため、絶対精度の仕様を緩くすることによって IC の歩留まりを上げ、コストを下げるのが可能でした。

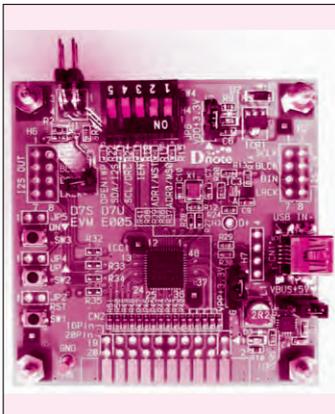
初期のオーディオ用 16 ビット D-A コンバータの多くは、16 ビット精度とは名ばかりで、その実力(精度)は 13~14 ビットが当たり前、よくても 15 ビットでした。

同時にビット数競争が起きました。実際の精度ではなく回路が何ビットで構成されているかだけが宣伝されたのです。しかし、16 ビットの実力を持った 20 ビット D-A コンバータも生まれ、当時のビット数競争は一概に無意味とはいえないようです。

図3に示すレーザー・トリミングによって精度を向上させるのは常套手段でしたが、16 ビットの精度を確保するには不十分でした。それに加え選別という手法が用いられました。同じ型名の IC でも写真1に示す末尾の記号で選別グレードを表したり、写真2に示す選別品専用マークを印刷して区別し、最終製品では、高級機と汎用機で選別された IC を使い分けることによって、トータルでのコスト・ダウンを図っていました。

● 90年代後半…1ビット D-A コンバータ IC が普及

90年代後半から、図4、図5のような 1 ビット D-A コンバータ IC が普及しはじめます。マルチ・ビット



第4章 アンプも内蔵！入口から出口まで 完全デジタル

フル・デジタル・ スピーカ駆動 IC Dnote7U

安田 彰

本章では、近年開発されたデジタル・スピーカの基本動作原理を説明します。続いて世界で初めてこの技術を1チップ化した Trigence Semiconductor 社の Dnote7 の特性および使用方法を紹介します。このチップは、実験キット DNSP1 - TGKIT (CQ 出版社) にも搭載されています。

本章で紹介するのは、スピーカをビット・データで直接駆動することに挑戦した、フル・デジタル・スピーカ駆動 IC Dnote (Digital Signal Processing for Digital Speaker) です。USB または I²S インターフェースで PCM オーディオ・データを入力すると、複数のボイス・コイルを持つマルチ・コイル・スピーカにデジタル・データをそのまま供給します。DSP を内蔵しているためイコライザをはじめとするさまざまなデジタル・フィルタ処理が可能です。もちろん 24 ビット、96 kHz のハイレゾ音源にも対応しています。

〈編集部〉

スピーカとパワー・アンプを デジタル化する検討

● スピーカまで…完全デジタル化を目指して

▶ 残りはパワー・アンプとスピーカ

図1は、現在のオーディオ装置のブロック図です。

入力ソースである CD には PCM コードで、スマホには MP3 などの圧縮コードのデジタル・データとして音楽信号が保存されています。一方、出力につながる負荷であるスピーカやヘッドホンは、アナログ信号で駆動しているため、デジタル・オーディオ・データは、途中、D-A コンバータでアナログ信号に変換しています。

D-A コンバータは、出力が小さいのでスピーカを直接駆動することができません。そこで、小信号アンプで信号の電圧増幅し、さらにパワー・アンプで電力

を増幅してスピーカを力強く駆動します。

大きな出力の電力を得るには、電源電圧を高くする必要があります。パワー・アンプの電源電圧には、5～20 V またはそれ以上が使われます。パワー・アンプには AB 級が広く使われてきましたが、最近では電力効率の高さから D 級や G 級が使われています。

▶ オーディオ・システムは1982年から変わっていない

この構成は、1982年にCDが生産開始されてから今まで、ほとんど変わっていません。

せっかくデータがデジタル信号として保存されるようになり、信号の劣化を最小限に抑えられるようになったのに、スピーカとそれを駆動する回路がアナログ回路のままです。もしデジタル信号でスピーカを直接駆動できれば、アナログ回路を一切使わないで再生系を実現できます。

● 検討1…4ビット・デジタル・スピーカ

CD が実現された当時、既にスピーカをデジタル化する考え方がありました。図2に示すように、スピーカをサブ・ユニットに小分けして、**振動板の大きさの比率を、1:1/2:1/4:1/8 というふう**に2のべき乗にします。そして、対応する2進コードの各ビットで駆動します。

▶ 製造技術が追い付かない

16ビット分解能を再現できるデジタル・スピーカを作るには、サブ・ユニットの振動板の大きさの比率精度を0.0015% (≒ 1/256) 以下にする必要がありますが、コストが見合わず非現実的です。

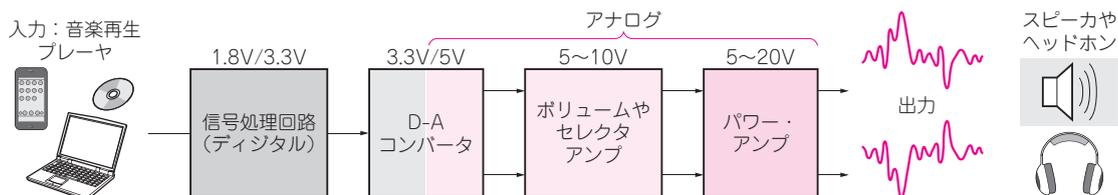


図1 現在の典型的なオーディオ・システムの構成



第5章 5,000 円の手のひら Linux ボードと 0 円ハイレゾ対応 OS で手軽に

Raspberry Pi で作る 24ビット・ ネットワーク JukeBox

中田 宏

本章では、Raspberry Pi と USB DAC の組み合わせで、コンパクトな音楽再生システムを作りました。また、使い勝手を向上するために、ソフトウェアの設定で機能を追加します。

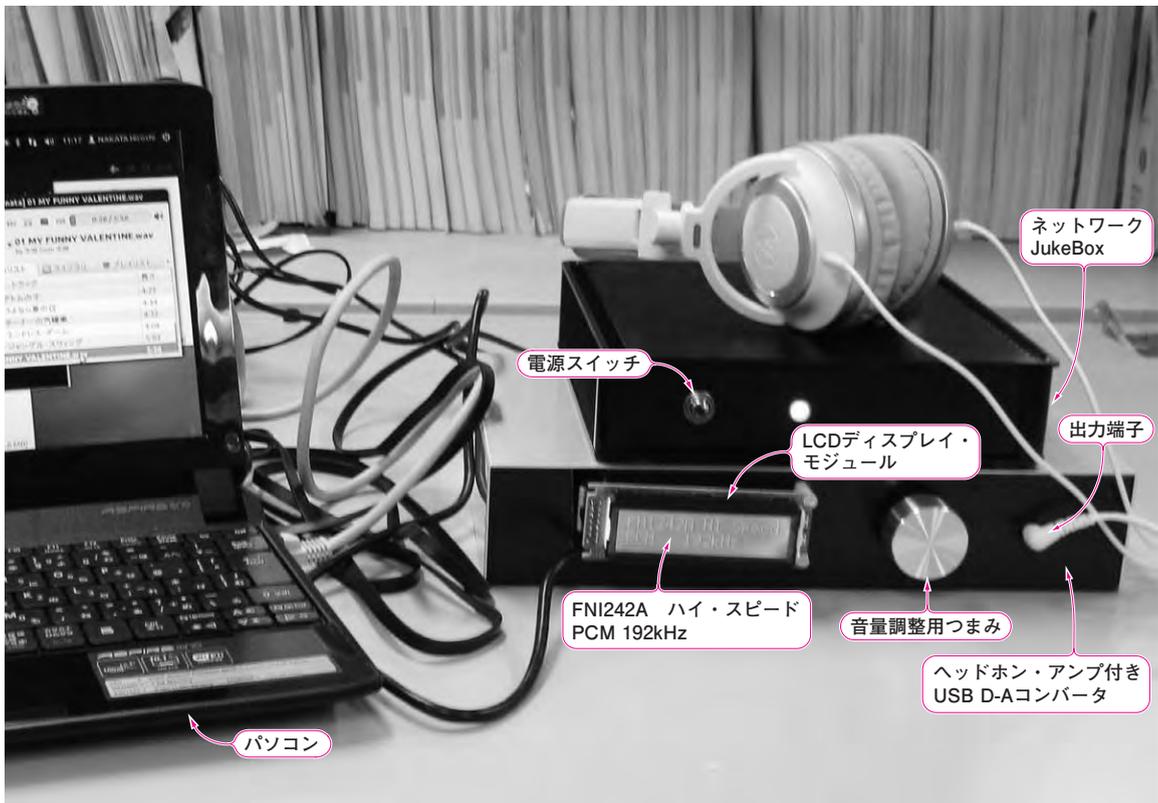


写真1 製作したネットワーク JukeBox
操作や音楽ファイルをネットワークを介してやりとりできる。

Linux コンピュータ・オーディオの 幕開け

● PC オーディオの魅力

パソコンに USB D-A コンバータ(以降, USB DAC)を接続して、パワー・アンプでスピーカやヘッドホンを鳴らす PC オーディオが 1ジャンルとして定着しました。パソコンなら数百枚の CD ライブラリを蓄えていても、すぐに欲しい音楽を検索して再生できます。昔のように CD 棚の前で迷ったりする必要はあ

りません。

ただし、音楽を聴くためにいちいちパソコンを起動するのは面倒です。起動に 1 分近く待たされますし、ハード・ディスクが回転する音やファンのノイズも邪魔です。

● 製作した「ネットワーク JukeBox」の特徴

今回、手のひらサイズの低価格 Linux コンピュータ Raspberry Pi (ラズベリー・パイ) を使ってコンピュータ・オーディオを作りました(写真 1, 図 1)。図 2 に

第6章 SACD に採用され、今世界中で注目されている

1ビット・オーディオ・フォーマット DSD の研究

石崎 正美 / 安田 彰 / 落合 興一郎 / 中田 宏

本章までのデータ形式は、主に PCM タイプ(Pulse Code Modulation)でしたが、本章では、DSD デジタル・オーディオ信号を再生できる $\Delta\Sigma$ 型 D-A コンバータの信号処理技術や規格を研究します。 〈編集部〉

本章で紹介する DSD(Direct Stream Digital)は、時間幅が一定の1ビット信号の符号の積み重ねによって、上または下に出力波形が変化するオーディオ・フォーマットです。一つの1ビット信号で変えられるレベルは1段階だけですが、1ビット信号を可聴周波数に比べて非常に短い周期で重ねることで、複数段階のレベルを表現できるようになります。

なお DSD は登録商標です。

研究1

DSD オーディオ信号の実際の波形

● 実際の DSD 信号

DSD 信号は、 $\Delta\Sigma$ 変調器で生成します。

図1のように、アナログの音声を $\Delta\Sigma$ 変調器に入力すると、0を基準にして入力信号が+方向ならパルス密度が濃く、-方向ならパルス密度が薄くなります。

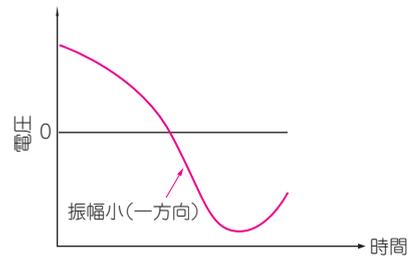
パルスはすべて同じパルス幅でパルス密度を表現していますが、実際の DSD 再生機は+方向に振幅が大きく、パルス密度が濃い部分で“H”(1)に反らずパルスの幅を広げています。これは、パルス幅変調 PWM(Pulse Width Modulation) に似ています。

DSD オーディオ信号を送受信するときは、次の4本の信号線が必要です。

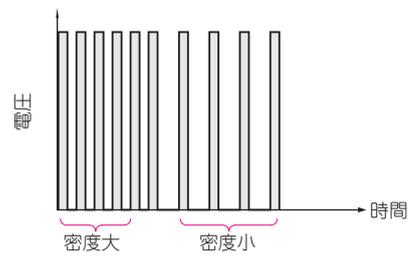
- (1) ビット・クロック(DSDBCK)
- (2) 左チャンネル信号(DSD-L)
- (3) 右チャンネル信号(DSD-R)
- (4) システム・クロック(MCLK)

DSDBCK がサンプリング周波数で DSD 対応 $\Delta\Sigma$ 型 D-A コンバータは、この立ち上がりまたは立ち下がりデータでデータを順次取り込みます。同期に必要なのは DSDBCK だけなので、MCLK がなくても動くプレーヤもあります。

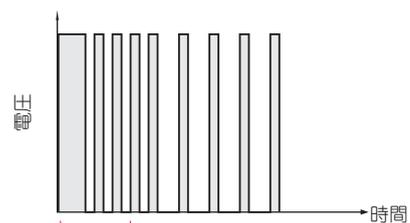
写真1に示すのは、音楽を再生しているときの DSDBCK と DSD-L です。DSD 信号の粗密が見えます。



(a) アナログ信号入力



(b) $\Delta\Sigma$ 変調器の出力(原理図)

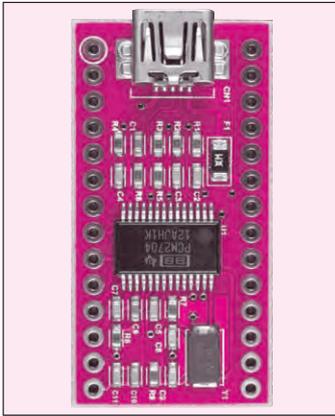


(c) 実際の出力

図1 DSD フォーマットのデジタル・オーディオ信号が生まれるまで

DSD 対応 $\Delta\Sigma$ 型 D-A コンバータは、送られてきたサンプリング・クロック DSDBCK に同期して DSD-L を取り込みます。実験に使った D-A コンバータ IC は、立ち上がりで DSD-L を取り込むタイプなので DSD-L を数十 ns 遅らせています。

第2部 デジタル・オーディオ用デバイスの研究



第7章 マイコンも専用電源もいらない！ 完成度の高い定番 IC で作る

PCM2704で作るお手軽PCオーディオ USB DAC ヘッドホン・アンプ

佐藤 尚一

パソコンのデジタル音源をパソコンに頼らずに鳴らすときに欠かせないのがD-Aコンバータです。本章では、USBインターフェースを持つD-AコンバータIC PCM2704を使って、USBバス・パワーでヘッドホンを駆動できるUSB DACヘッドホン・アンプを製作します。つなぐだけでPCオーディオを楽しめます。〈編集部〉

PCオーディオ製作の定番 USB DAC PCM2704

写真1に示すPCM2704は定番のUSB D-AコンバータIC(以下USB DAC)として知られています。

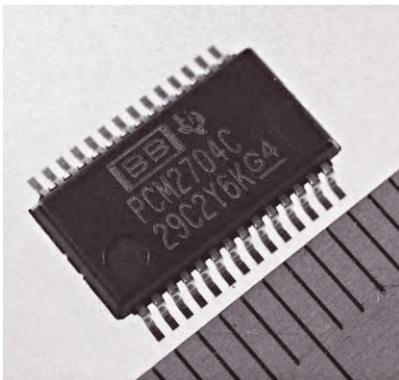


写真1 世界中で使われているUSB DACの定番PCM2704(テキサス・インスツルメンツ)

パソコンからのUSBオーディオ・データをアナログ信号に復調します。さらに低インピーダンス型のヘッドホンも駆動できます。ライン出力として扱うことも可能です。USBバス・パワーの5Vで動作します。PCM2704と少しの周辺部品、USBケーブルとヘッドホンを接続するだけで使用できます。

OS標準のドライバ(USBオーディオ・クラス)に対応しているので、パソコンに専用のドライバをインストールする必要がありません。

現在はCバージョンのPCM2704Cで、Windows 7に対応しています。それ以前のバージョンも信号が入力されてから出力が現れるまでの遅れ時間(レイテンシ)の調整などが主で機能的には同じです(初期のバージョンPCM2704もWindows 8.1で動作する)。図1にPCM2704の内部ブロックを示します。

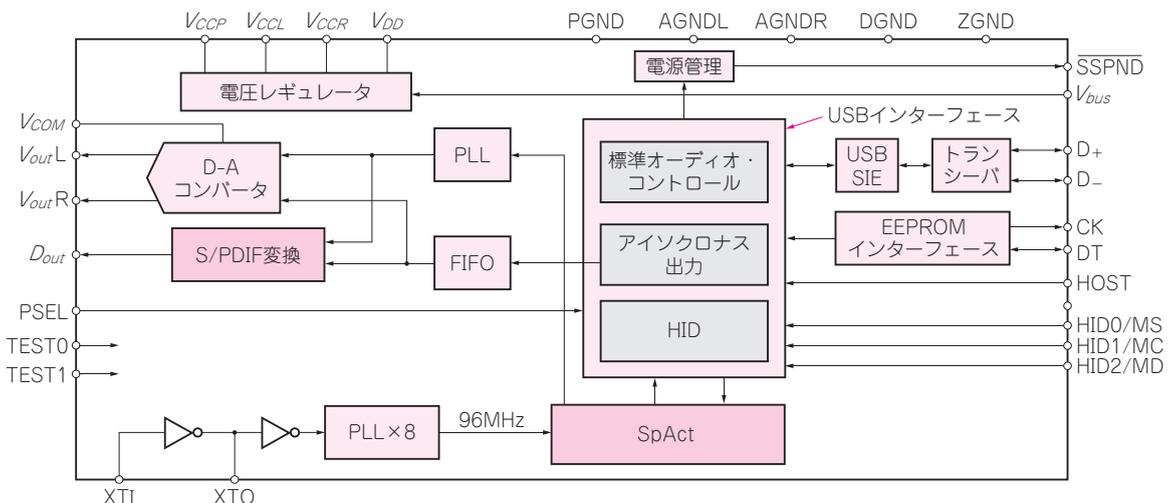
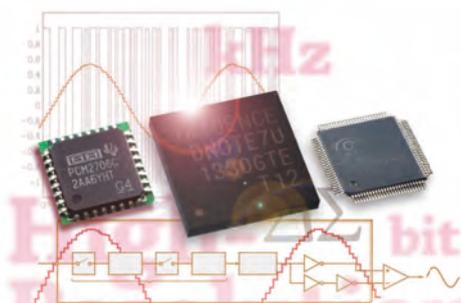


図1 定番USB DAC PCM2704Cの内部ブロック



24ビット D-Aコンバータから低雑音電源まで
**ハイレゾ・オーディオの
回路技術と製作の素**