

特集

10年の歩みと展望

## ハイエンド・オーディオの軌跡

高松 重治、大貫 昭則 アキュフェーズ株式会社

本節ではとくにハイエンドと言われる機器に特化して述べよう。デジタル処理技術は、ここ10年間でオーディオ界だけでなく電子業界を一変させた。従来から考えられていた複雑なシステムが、簡単しかも正確に実現できることにある。2002年からの10年間は、新しい素子の開発は少なく、またそれらの改良・改善も行われていない。むしろ通信関係に多くの技術が注ぎ込まれている。これらの中でハイエンド・オーディオがいかに前進できたかを記す。

## 1. プリアンプ

プリアンプの主たる機能は、①入力を選択する、②音量を変える、である。これらの信頼性を保ちながら、確実に機能することが大切である。30年ほど前から入力信号の選択は環境の影響を受けにくい小型リレーが採用されてきた。信号経路の最短の部分で任意の場所で切り替えられることから、瞬間に

全機種に採用されていった。これらの切り替えのシーケンスにはCPU (Central Processing Unit) が使われ、信号レベルの小さな部分でもノイズを出すことなく、信頼度の高い切り替えを可能にした。

他方、音の大きさを制御する方法として、真空管の時代から抵抗体をブラシで摺動する可変抵抗器を使って、入力電圧を分圧する方法が使われてきた。その改良は次のように行われてきた。

抵抗面の平面度の高精密化、スライド (摺動) 部分のブラシの多重化、ステレオ使用であるので二つのギャング (gang: 連結) エラーの改良、回転角度に対する音量変化の度合い等である。例えば、利得を  $-60\text{dB}$  絞ると、その時の抵抗値は全抵抗値の  $0.1\%$  になるので二つの抵抗値を合わせることは至難の業である。抵抗面の平面度に付いては、CP (Conductive Plastic: 導電性プラスチック) 抵抗素子が採用された。CPは一般に、プラスチックに炭素系導電体を混入して圧縮加熱するなどして成型する。しかし、アキュフェーズでは抵抗値の精度を上げるため、鏡面仕上げした金型に抵抗体を印刷し、そこにプラスチックを流し込んで抵抗体を形成した。さらに抵抗値補正のためのトリミングは、ミクロン単位であっても歪率劣化を招くので行わず、選別によって素子を組み合わせた。この摺動面は鏡面に近いフラット性を持ち、接触面のスムーズ性が得られ、ブラシは摩滅しにくい。この抵抗変化率を直線的にするなど数々の改良が行われた。しかし、抵抗素子に物理学的に発生する熱抵抗雑音<sup>\*1</sup>は防ご

## ■筆者プロフィール



高松 重治 (たかまつ しげはる)  
略歴  
東京都出身。66年芝浦工業大学電気工学科卒。トリオ株式会社 (現JVCケンウッド) を経て、アキュフェーズ株式会社 (旧ケンソニック) 創業から参画。長年技術を担当、現在製品企画担当。AES会員。  
半世紀に亘るオーディオ・フリーク人生。オーディオ座右の銘「アナログ・デジタルの垣根はない」を信じて結果を大切にしています。



大貫 昭則 (おおぬき あきのり)  
略歴  
神奈川県出身。91年工学院大学電子科卒。同年アキュフェーズ株式会社に入社。音響工学を専門とし、技術部で主にデジタル機器の設計に従事。AES会員。  
多くの人々とオーディオの楽しさを共有できたらと思い、この仕事に生き甲斐を感じながら没頭しています。

\*1 熱抵抗雑音: 抵抗素子内の電子の不規則な熱振動によって生じる雑音。抵抗値  $R$  ( $\Omega$ ) の抵抗体で発生する熱雑音電圧の2乗平均は、 $e^2=4kTBR$ と表される ( $k$ : Boltzmann定数 [J/K]、 $T$ : 絶対温度 [K]、 $B$ : 測定対象となる帯域幅 [Hz])。



図1 AVAA方式プリアンプ「C-3800」(2010年)

とはできない。

これらを解決する方法としてアナログ信号をデジタル化し(A-D変換)、デジタル乗算器によって信号の大きさを変え、再びアナログ信号に戻す、いわゆる「デジタル・プリアンプ」が考案された。しかし、デジタル入出力を有する機器の減少や、デジタル処理アレルギーのハイエンド・ユーザーの賛同を得ることができず今日に至っている。

そこで考案されたのが、音楽信号を数種類(実用段階では16種類)の電流源に分け、この電流源を所望の大きさに従った信号によって電流の束に変え、この電流信号を再び電圧信号に変換する方法であり、音量調整回路AVAA(Accuphase Vari-gain Amplifier)として実用化した(図1)。

得られた音楽信号は抵抗の大きさに頼らないの

で、①抵抗熱雑音の影響を最小限に抑え一定にできる、②周波数特性がボリュームの位置(音楽信号の大きさ)によって変化しない、③分解能が最小電流源まで可能になる、④物理的にチャンネル数を増加してもそれぞれのチャンネルへの影響がない、⑤音楽信号が機械的な部分を通過しない、などのメリットがある。デメリットとしては部品点数が大幅に増加することだが、それはメリットの大きさには計り知れないものがある。この原理を図2に示す。

図2では従来の回転型つまみ(ボリューム)を回して音量を設定するようになっている。しかし、ここに使用されているボリュームは直流電圧をかけて、回転角度検出だけに用いており、このデータ値を電流源の設定に使用してだけである(リモート・コントロールによって押しボタンスイッチ操作が可能である)。

2002年に発売され「Accuphase C-2800」に初めて搭載されたこのAVAAシステムは、一見デジタル処理のように思われる。しかし、電流源のミキシングは高速処理が要求されるのでCPUが用いられている以外には、純然とアナログ処理である。この電流源には16種類が用いられ、分解能にして最大信

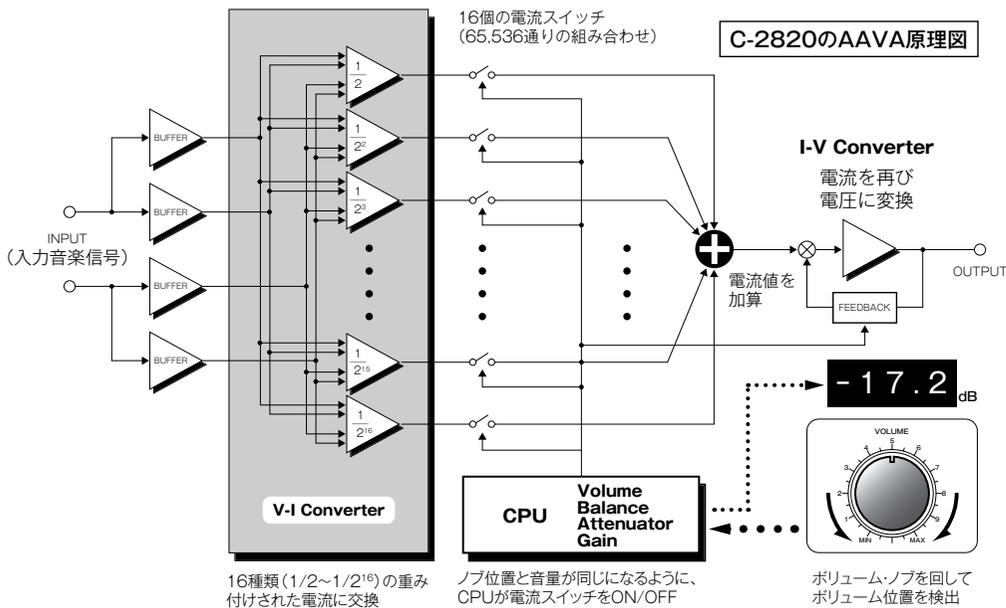


図2 AVAAの音量調整器の原理図

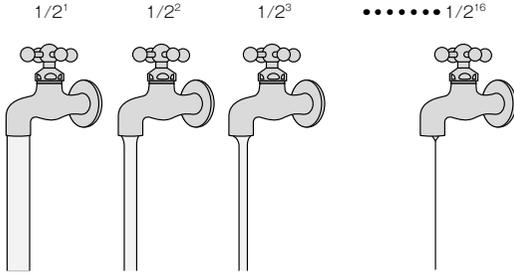


図3 電流の重み付けを水量で例えたV-I Converter

号の $1/2^{16}$ 、換言すれば $1/65,536$ の精度で音量が変えられる。つまりノイズレベルまでの音量が可変可能になり、小音量でも左右のバランスは崩れることはない(図3)。

左右の音量を可変する「バランス・ボリューム」、急に音量を小さくしたい時に用いる「ミュートイング/アッテネータ」なども同じAAVAをCPUを介して制御すれば、余分に抵抗体を挿入する必要がない。まさに理想的な音量可変システムと言える。最終段の電流-電圧変換回路で、簡単・良質にシステム全体の利得が変えられるなど、計り知れない利点の多いシステムである。

さらに、アドバンス指向として音楽信号の+側と-側に本回路を用いることによって、共通接地(グラウンド・ライン)の影響を受けにくい「バランス構成」が成立する。ノイズの影響が目立つ上位ビットに「パラレル技術」を用いることによって、一層の低ノイズ化が可能になるなど、改良が加えられている(C-3800)。

AAVAの特徴をまとめてみると、

- ・ 信号経路に抵抗体がない。
- ・ 極限の雑音レベルを実現。
- ・ 周波数特性が設定レベルによっても一定。
- ・ システムのレベル・ダイアグラムがシンプル。
- ・ AAVA: LEVEL、ATT、BALANCE (Left/Right)の同一制御。
- ・ 切換えはデジタル技術(機

械的接点が無い)。

- ・ 16ビットの細かさでレベル設定が可能。
- ・ 正確な利得で設定・表示が可能。
- ・ Left、Right単独任意設置。
- ・ 従来の感覚で音量が設定可能。
- ・ 構成部品が莫大。

## 2. チューナ

オーディオ分野ではFMチューナが大切な音源として、一頃のエアチェック(録音マニア)を生み出した。時代の変遷とともにこれらは減少し、同時にチューナの改良は進まなかったし、メーカーの努力も滞っていた。高周波技術にデジタル技術を長年阻んできたのは、A-D変換器の高周波領域の動作である。

一方、PLL (Phase Locked Loop) 技術は古くから存在していたが、半導体の出現によって複雑なPLLが一挙にチューナに取り入れられ安定した受信が可能になった。放送波を捕捉するテレビやFMチューナには局部発振器、カラー信号捕捉、ステレオ復調器などに用いられている。しかしPLLはフィードバック技術であり、そのS/N(信号対雑音比)は低い周波数の水晶振動子や入力信号に頼っているので限界がある。図4はPLLの原理である。出力周波数は水晶発振周波数(ステップ間隔)の分周器倍になっていることが分かる。換言すると水晶発振器の通倍器である。

ここで出現したのがNCO (Numerically Controlled Oscillator) である。これは、DDS (Direct Digital Synthesizer) とも呼ぶことがある。2005年に発売した「T-1000」ではフロントエンド部の局部発振器

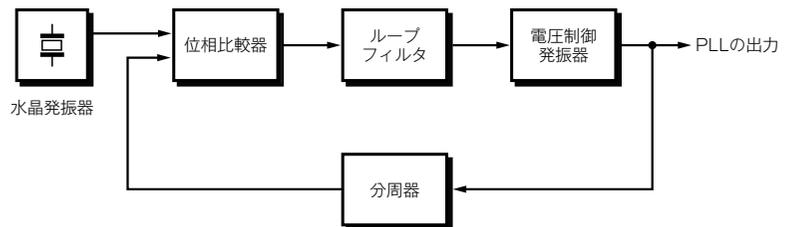


図4 PLL原理図

とFM復調器のパイロット信号から得るデコーダ信号復調に、世界で初めてソフトウェアによるNCOを採用した。またL/R信号の復調もソフトウェアによるものである。

PLLとNCOの簡単な動作原理を図5に示す。PLL

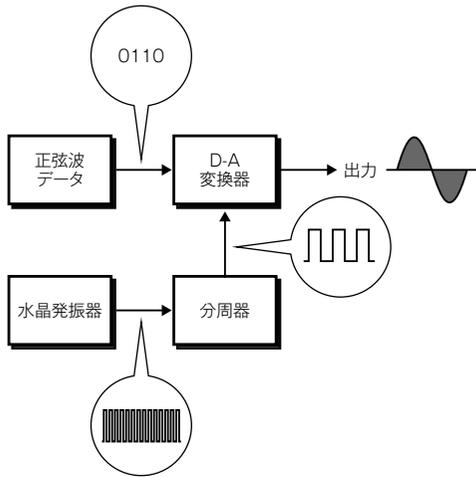


図5 NCO (DDS) 原理図

は原理的に通倍器であるので、SSB（単側波帯）位相雑音は基準発振器の周波数の通倍分だけ悪化する。それに対しNCOでは基準発振周波数のS/Nが保たれる。

「T-1100」（2009年）では、受信周波数用の局部発振器にもNCOを採用した。この結果、従来のPLLによる局部発振器では得られなかった信号純度を表すSSB位相雑音が飛躍的に小さくなり、大幅なS/Nの改善があった。これに用いられたD-A変換器の動作周波数は786.432MHzに上る。このD-A変換器の原発振器には直接発振周波数が196.608MHzと加工技術の粋を集めた日本製の水晶振動子が使用されている。

さらにFMフロントエンド直後でFM信号をデジタル変換し、従来のIF（Intermediate Frequency：中間周波）増幅器に当たる部分からデジタル処理を行っている。IF部の選択度を得る中間周波フィルタ、マルチパス除去、FM復調器、ステレオ復調器まですべてソフトウェアによって処理を行ない、筆

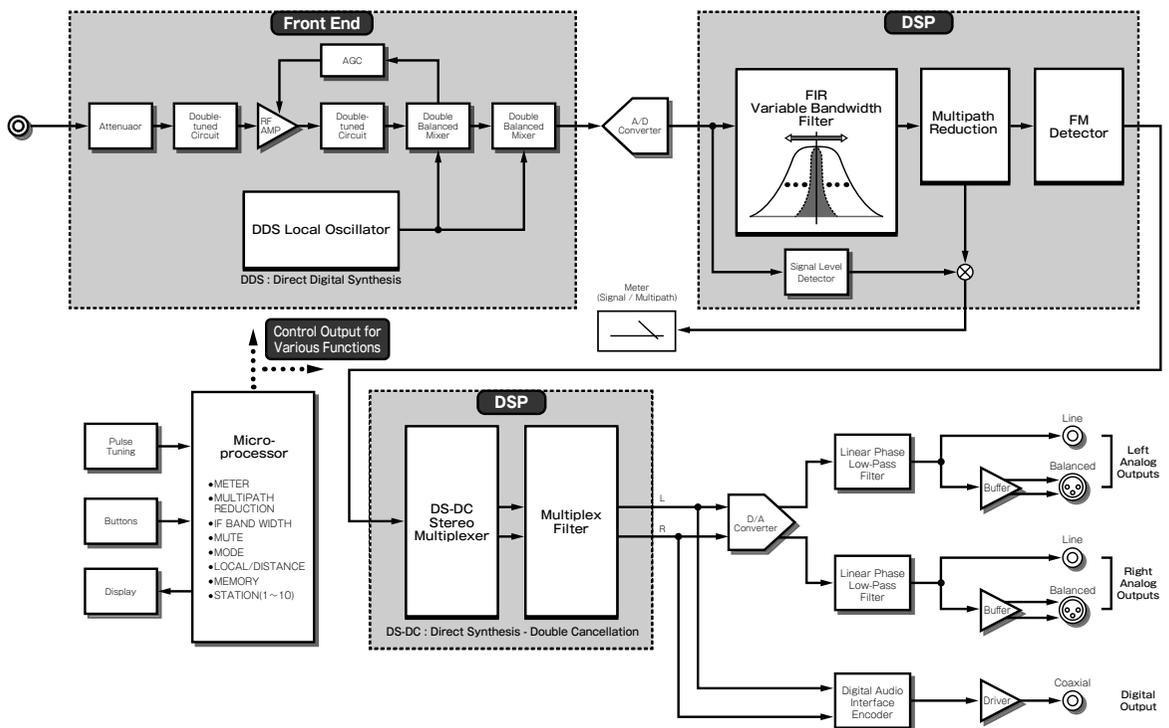


図6 T-1100のブロックダイアグラム

者の長年の夢が実現した。ここに使用したIFサブシステム「AD9864」は、サンプリング周波数  $f_s=24.675\text{MHz}$ 、分解能16ビット、バンドパスΣΔ A-D変換器などを搭載した回路であり、ここの性能がシステムの大きなキーポイントになっている。

アナログ回路によるスーパーヘテロダイン受信方式のIF増幅は、フィルタの特性がFM復調歪に大幅に影響する以外に、増幅素子の増幅度やフィルタの配置によって選択度が大きく左右される。しかし、デジタル処理の場合はこれらの危惧から解放され、隣接妨害が著しく改善された。フィルタにはFM変調波に最適である群遅延特性が平坦（直線位相）な FIR（Finite Impulse Response：有限インパルス応答）型を用いている。

マルチパス妨害と呼ばれる放送局から受信機までの放送波の多重波到達による合成歪は、アナログ時代から研究されていた。BBD（Bracket Brigade Device）などを用いてアナログ処理を試みた時代もあったが素子の供給面・回路規模などから実現しなかった。これらはデジタル演算処理で実現可能になった。

FM波の復調器は、アナログ回路では低歪復調の観点から多種の方法で研究・実用化されてきた。こ

れは変調周波数（信号波の99%の捕捉で198kHz以上の帯域が必要）や周波数偏移の大きさにより広帯域になることで、いかに直線性を保つ（歪率を小さくする）かが大きな課題であった。これらもデジタル演算によって高い周波数まで直線性が得られている。

FM復調器が理想的になると、ステレオ信号の左右の弁別（分離度）は低域周波数から高域周波数までほぼ理論的な値が得られる。アナログ処理であると、低域周波数は例えばカップリングに用いられるコンデンサによって低い周波数の位相がずれ、高い周波数では若干の高域レベルの低下によっても位相特性が維持できず、左右信号の分離度が劣化する。

これらが実現できた事柄であるが、この先の課題項目として受信部のトップ（フロントエンド部）の位相レベルまでの正確な処理（IQ演算）が可能になれば、アナログ回路で問題になるイメージ妨害比や1/2 IF妨害比などからも解消される。

このようにアナログ放送のデジタル処理による受信方法は現在では多大なコストを要する。しかし、従来の受信システムと互換性を保ちながら、上質なシステムに仕上げる大切な手法と考える。FM放送で実現したが、AM放送では災害時には大切な情報源であるので、現状システムを維持しつつ受信機側でのデジタルによる音質や混信などの受信改良が、日本オーディオ協会70周年記念頃までには、行われることを望む。

### 3. ディスクプレーヤー

CD誕生30年を迎えた。CDが伝達システムとして短期間に一般大衆に浸透し、しかも30年続いているのはAM放送、FM放送、そして既に終了してしまったアナログテレビ放送に次ぐ完成度の高いシステムだからである。これらのディスクプレーヤーを支えてきたのが、伝達システムのデジタル化とD-A変換器の改良・進化と考え

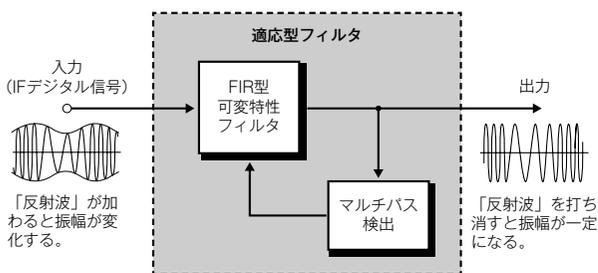


図7 デジタル処理によるマルチパス・リダクション

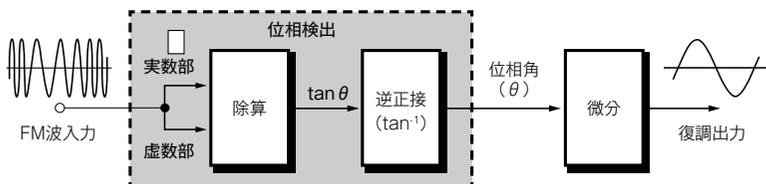


図8 ソフトウェアによるFM波復調の原理



図9 セパレート型SA-CDプレーヤー「DP-900/DC-901」(2011年)

る。当初D-A変換器の実力は12ビットそこそこであったが、今日では20ビットを凌駕する製品が出現し、CDだけでなくネットオーディオなどでも実用化されるようになってきた。

一方、四半世紀以上続くシステムを危惧し、DVD-AudioやSA-CDが考案された。その他コピー問題は他稿に譲るとして、録音可能なシステムがディスク上で多くが考案された。しかしこれらは回転機構を有しない半導体やパソコンレベルに変わってきた。その中で、BD (Blu-ray Disc) を使用した、

BDM (Blu-ray Disc Music) はMusicが中心であり、付加機能としてMovie、さらにディスクを陳腐化させない機能としてOnline Accessを設け、ディスク所有者に最新情報を供給する今までなかったスタイルを構築し、10年20年後でも使えるディスクを目指したものが考案され、既に発売されている。

ハイエンド・オーディオでは、やはりSA-CDを挙げざるを得ない。良質な録音・ミキシングされたCDは16ビット/44.1kHzの制限を感じさせないが、SA-CDの出現はハイビット・ハイサンプルの世界を満足させ、これらを良質に再生するために努力したプレーヤーは、CDの再生に於いて極限を可能にしている。

CDのビットレートは16ビット/44.1kHzで制限を受ける。しかし、D-A変換器がそれを上回れば、全高調波歪率 (THD+N) は0.0015%を示し、理論値通りとなる。前述のようにSA-CD再生には、さらに性能の良いD-A変換器が必要で、全高調波歪率 (THD+N) は0.0002%を超えるものが製品化されている。DSD (Direct Stream Digital) 信号は24ビットを上回るダイナミックレンジを有することから、さらなる高性能D-A変換器の製品化も今後の課題と

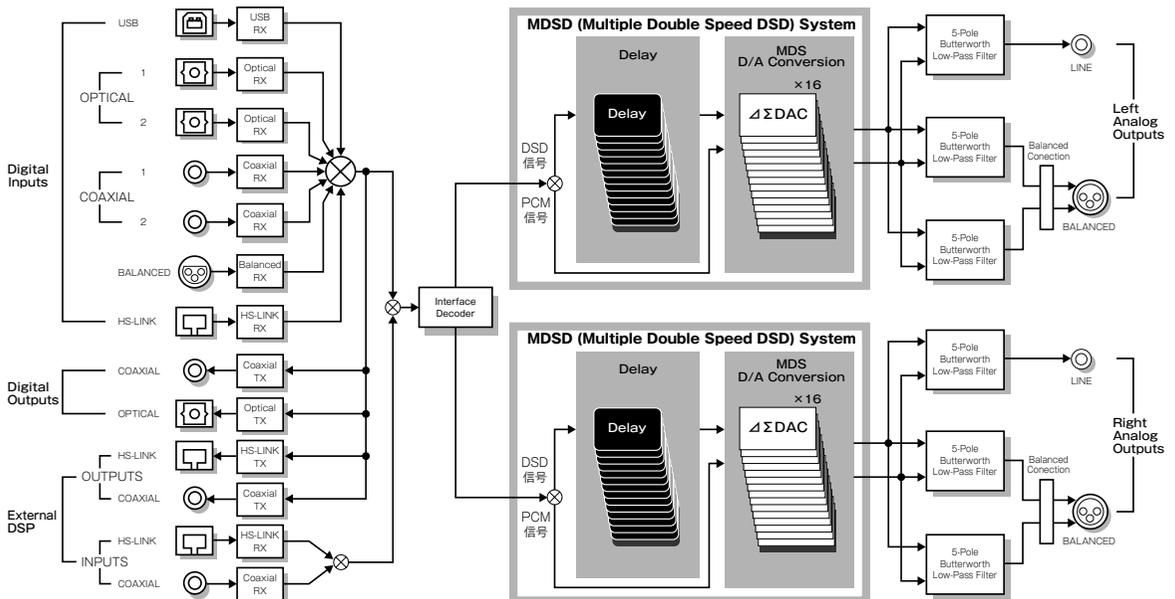


図10 「DC-901」ブロックダイアグラム





図12 グラフィックイコライザ「DG-48」(2007年)



図13 チャンネルディバイダ「DF-55」(2011年)

でも、全く問題のないレベルに達している。そしてマルチチャンネル・スピーカーシステムや音場作成システムなどの周波数や位相特性をデジタルで操作することが可能になっている。ユーザーが簡便な計測システムを操作することで、ユーザー独自(固有)のシステムの構築が可能になってきた。

DGシリーズはデジタル化されたグラフィックイコライザである。当初から計測システムを導入し、ユーザー宅における音場補正を可能にした。1997年に発売された「DG-28」は64バンドのグラフィックイコライザと音場補正システムを一体化し、コンピュータなどへの接続をせず、全ての調整が可能なシステムである。2012年現在三代目目の「DG-48」へと引き継がれている。高精度の音場補正を行う時、より多くのバンド数を必要とする。そのため高精度と使い勝手は相反するが、タッチパネルなどの分かりやすいユーザーインターフェースを採用することで、使い易さと高性能の両立をしている。

また、DFシリーズでは周波数分割器として一つのチャンネルの上下遮断周波数、上下遮断スロープ、チャンネル間の遅延時間設定、増幅度を個別に設定できることを特徴としている。デジタル信号処理では遅延の調整が容易であり、本機では各帯域の遅延量を左右独立に設定できる機構を持ち、アナログでは成し得ない処理を実装している。

デジタル信号処理の利点は安定した性能の確保にある。またアナログフィルタ処理を行った場合、挿入時の音質変化を最小限に留めることに設計工数を費やす。しかし、デジタル信号処理の場合は性能と音質が全く別の領域で設計可能であることも大きな特長だろう。前述のとおりデジタル信号処理を効率的に活用するには、全ての入出力をデジタル化し、スピーカーの間際でD-A変換することが理想である。

しかしながら、デジタル・インターフェースの最大の泣き所は、フォーマットに忠実でないと伝送ができない点である。アナログ伝送は伝送方式、信号極性、標準電圧が合っていれば機器を選ばず接続が可能である。これは大きな特長でもあり、長きに渡り普遍的に受け継がれている所以でもある。これらを勘案し、内部処理はデジタルであっても、外部インターフェースは柔軟性が高いアナログとし、優れたA-D変換器、D-A変換器を併せて設計開発、デジタル信号処理と共に製品化することで、信号フォーマットによらない柔軟な製品が可能である。

デジタル信号処理によって開花した現代のオーディオは、21世紀の権化であり、アナログだけでは到達できない理想郷である。

#### ●参考文献

- 1) 高松重治, 『わかるPLLの応用テクニック』, 日本放送出版協会.
- 2) ラスティスセミコンダクタ, <http://www.latticesemi.co.jp/products/intellectualproperty/ipcores/numericallycontrolledosci/index.cfm>
- 3) アルテラ, <http://www.altera.com/products/ip/altera/t-alt-dds.html>
- 4) アンリツテクニカ, [http://downloadfile.anritsu.com/RefFiles/ja-JP/About-Anritsu/R\\_D/Technical/81/81\\_08.pdf](http://downloadfile.anritsu.com/RefFiles/ja-JP/About-Anritsu/R_D/Technical/81/81_08.pdf)