

デジタル・オーディオ信号処理の現状と将来

Current Status and Future Trend of Digital Audio Signal Processor

伊藤 辰 男⁽¹⁾ 磯 貝 保 広⁽²⁾
Tatsuo Ito Yasuhiro Isogai

要 旨

カーオーディオ機器は、半導体、精密加工等の技術革新に支えられて、性能、機能が飛躍的に向上した。

CD、DATに代表されるオーディオ信号のデジタル化は、高品質な音響再生を可能にした。デジタル化されたオーディオ信号は、デジタルで処理を行うことによりコスト/パフォーマンスの高いシステムを構築できる。

当社は、高品質なオーディオ機器を実現するため、デジタル信号処理（アルゴリズム）の開発と共に、オーディオ専用の高性能なデジタル・シグナル・プロセッサを完成した。

本稿では、デジタル・シグナル・プロセッサ（DSP）の開発動向を概観し、当社が開発したデジタル・オーディオ・シグナル・プロセッサ（FT8800）の開発のねらい、応用例、将来展開などについて述べる。

Car audio equipment has better performance and more functions because the latest semiconductors precise processing techniques are in manufacture.

Audio systems like CD and DAT enable accurate reproduction because of digital signal processing.

We developed a digital signal processing algorithm and used it in the FT8800, a high performance digital audio signal processor.

We review the development of the digital signal processor and describe its applications and discuss projected improvements.

(1) 第一開発部

(2) モータロニクス本部

1. はじめに

ディジタル・シグナル・プロセッサ(以下DSP)が誕生して、既に10年程経過した。当初は、サンプリング周波数の比較的低い通信システムのキー・デバイスとして発展した。

その後CMOS VLSI技術の急速な発展に伴い高速処理(命令サイクル100ns以下)が可能となり、今日ではオーディオ・ステレオ信号がリアルタイムに処理できるまでに至った。

最近のオーディオ機器は、様々な機能が考案され多様化の一途である。多様化する機能をアナログ回路で実現しようとすると、専用のICが機能の数だけ必要となる。

しかし、DSPは、これらの機能をプログラムによって実現できる。所望の処理プログラムの組み合わせによって、同一ハードウェアでも異なった機能のオーディオ製品を作ることができる画期的なデバイスである。

以下の各章では、DSPの開発動向について報告し、当社のディジタル信号処理の開発に対する取組み状況について述べる。さらに、当社がオーディオ用にASIC^{脚注1)}化したDSPである、ディジタル・オーディオ・シグナル・プロセッサ(以下DASP)の概要と、その応用例について紹介し最後にDSP技術の将来展望について考察する。

2. ディジタル信号処理の歩み

ディジタル・オーディオは、原音の質をそこなわないという点で従来のアナログ方式よりも優れている。ディジタル・オーディオは、1937年にフランスのA.H.リーブスによって発明されたPulse Code modulation(以下PCM)通信と、

1949年にアメリカ(ベル研究所)のW.ショックレイらによって、発明された半導体(トランジスタ)の二つをルーツに持っている。

一方、ディジタルオーディオとして、1982年に世界統一規格となったCompact Disc(以下CD)は、優れた音質と使い易さで民生市場で大成功を収めた。更に1986年にDigital Tape Recorder(以下DAT)の標準化の合意が得られた。放送では1987年BS放送(Broadcasting Satellite)による音声のPCM実験放送が実施された。いわゆるオーディオの世界にディジタル化の波が押し寄せてきている¹⁾。

こうしたディジタル・オーディオの著しい成長は、レーザ、Analog to Digital(以下A/D)変換、Digital to Analog(以下D/A)変換、LSI、メモリなどの半導体技術に負うところ大である。

さて、DSPは、音という連続信号である情報を時間的に離散的の信号に変換し(これを標本化^{脚注2)}と呼ぶ)、この標本値を量子化することにより2進に符号化して処理する。復号化は符号化の逆操作である。音声符号化技術は、1962年に米国で実用化(8kHz標本化、8bit量子化^{脚注3)})され、PCM音声符号化方式の基本が確立した。現在ではディジタル公衆電話網(ISDN: Integrated Services Digital Network)における音声符号化方式として広く適用されている。

オーディオ信号は、1967年にNHK技研等からPCM録音の発表が行われ、CDへと発展してきた。以上のディジタル技術の歩みを表-1に、また音声信号符号化の開発動向を図-1に示す。音声PCM信号の復号器および処理器は、高速演算処理が不可欠であり専用LSI、汎用ディジタル・シグナル・プロセッサ(DSP)が必要である。

脚注 1)

ASIC: Application Specific Integrated Circuit 特定用途向け集積回路。

脚注 2~4)

本誌論文「DASP応用入門」2.1章に詳述

表-1 デジタル技術のあゆみ

	1950	55	60	65	70	75	80	85
デジタル技術 の 発 達	1837: モーリス符号	・ DPCM開発	・ MOS FET (ベル研究所)	・ 磁気バブルメモリ	・ 4ビットマイクロプロセッサ (インテル社)	・ 音声合成	・ ジョセフソン 素子	
	1854: プール代数	・ シリコン IC発表		・ LSI	・ VLSI (64KRAM)	・ 16ビットマイコン		
	1937: PCM発明(A. H. Reeves)				・ CCG(文字発生器)	・ ディスクカメラ		
	1854: リレーとスイッチ回路の記号法解析*(シャノン)	・ PCM 伝送帯域の圧縮・1Kビット RAM			・ 磁気バブルメモリ	・ 1Mビット 漢字ROM		
	1937: コンピュータ開発	・ バイポーラメモリ			・ 8ビット・マイコン	・ 256KMOS RAM		
PCMの発達	1938: トランジスタ発明(ベル研究所)					・ DSP・ガリウム砒素IC		
	1946: 通信理論*(シャノン)	・ CCD						
PCM録音	・ PCM 実験(ベル研究所)	・ PCM多重電話回線実用化	・ PCM録音機発表	・ テレビ特殊効果				
		・ 映像信号のデジタル化	・ フレームシンクロナイザ	・ PGM VTR				
			・ タイムベースコレクタ	・ ノイズリデューサ				
			・ PCM録音機	・ CD	・ DAT			
			・ Uマチックアダプタ式	・ PCM録音実用(固定ヘッド)				
			・ PCM録音機	・ MD・CD発売				
				・ AHD				

単一チップのDSPが登場したのは、1979年米インテル社が発表した2920が最初であり、以後各社から発表されている。

1983年に開発された富士通のMB8764は、サイクル時間が250ns前後であったのを一気に100ns台へ短縮し、オーディオ信号処理への可能性を示した。1985年以後に発表されたDSPは、演算速度やダイナミックレンジなど機能が大幅にアップ

された。表-2は、第1世代と第2世代のDSPの違いを示したものである。^{3), 4), 5)}

図-2は、各種情報源のサンプリング周波数と処理量の関係をに示したものであり、DSPは右上に向かって開発が進められている。

以上のようにオーディオ用DSPは、高品質、高能率にリアルタイム処理する高度なプロセッサと位置づけられる。

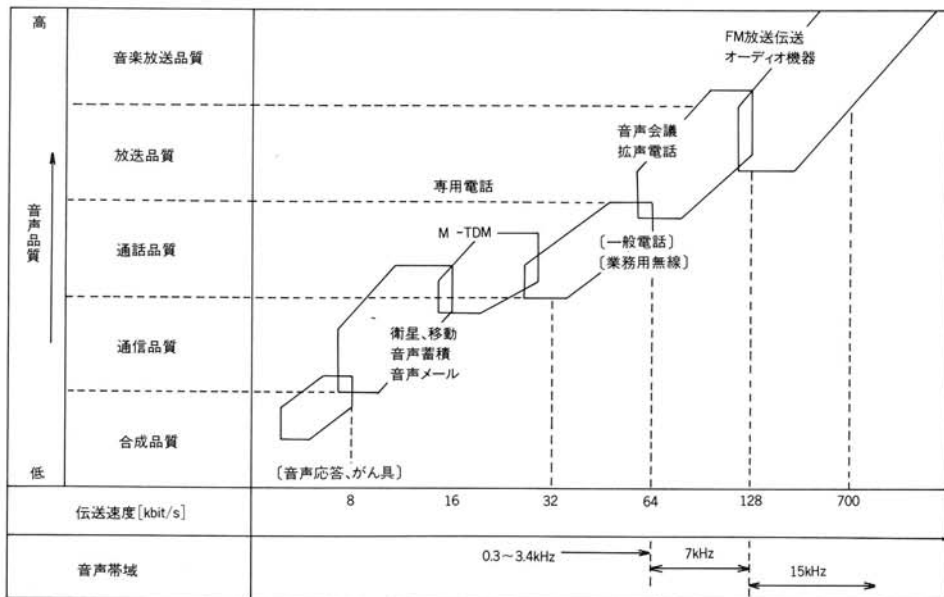


図-1 音声信号符号化技術の開発動向

Fig. 1 Development of voice coding techniques.

表-2 第1世代DSPと第2世代DSP

	第 1 世 代	第 2 世 代
演 算 形 式	固定小数点	浮動小数点
内 蔵 データ R A M 容 量	128~256語	512語以上
入出力ポート数	双方向 1 対	双方向 2 対
使 用 素 子 数	100K素子以下	100K素子以上
マ シ ン ・ サ イ ク ル	100~400ns	150ns以下
主 な 用 途	エコー・ キャンセラ	医療用画像処理

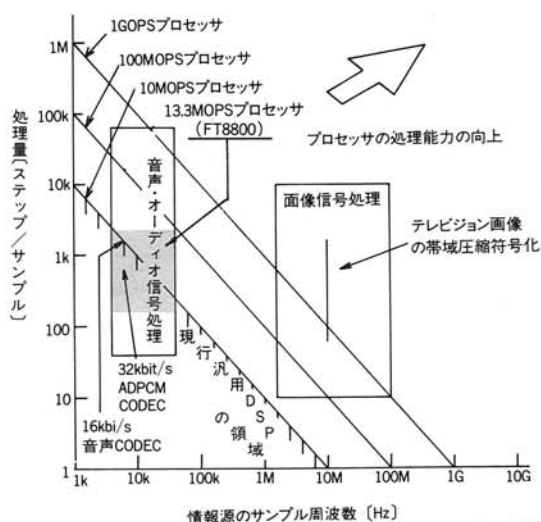


図-2 各種情報源のサンプル周波数と処理量

Fig. 2 Sampling frequency and information processing.

3. 当社のDASPの開発

3.1 開発の背景

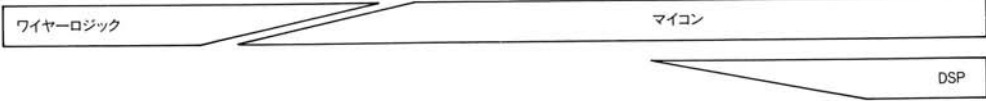
当社は、オーディオ機器にデジタル技術を表-3のような経過で導入し、開発を推進してきた。当初は、ワイヤロジックやマイコンによるメカニズムの代替、すなわち電子制御化を図ることであった。この時期の市場は、安定成長の時代に入り多様化、多機能化へと進み、市場要求を満たすにはマイコンのフレキシビリティが非常にマッチしていた。

このマイコンの出現は、あらゆる産業社会に多大なインパクトを与えた。

当社も同様にマイコン技術は、1978年のPLLシンセサイザ型電子チューナにマイコンを採用し量産を開始した。この時の技術資産は、カセット・デッキ、CD、DATなどに受け継がれている。

さらに、この技術はパーソナル無線、モトローナ機器等、当社製品のあらゆるものに採用さ

表-3 デジタル手法導入の経過と計画

	第 一 段 階	第 二 段 階	第 三 段 階
	1975～80年	1980～85年	1986～90年
開 発 の ね ら い	電子制御化 操作性の向上と表示器の視認性の 向上	小型、軽量化、高性能化 回路インタフェースの簡略化	多機能化、システム化 音声のデジタル処理化
技術形態			
適用技術 (製品)	① FLLシンセサイザ電子同調 ② PLLシンセサイザ電子同調 ③ マイコン・テープ・デッキ ④ 赤外線リモートコントロール	⑤ PLL、マイコンの1チップ化 ⑥ A/D、LCDドライバ、 PLLマイコンの1チップ化 (PLL Fmax 150 MHz) ⑦ CDプレーヤの開発	⑧ CD-ROMデコーダの開発 ⑨ DATの開発 ⑩ DASPの開発 ⑪ DASP・音場制御

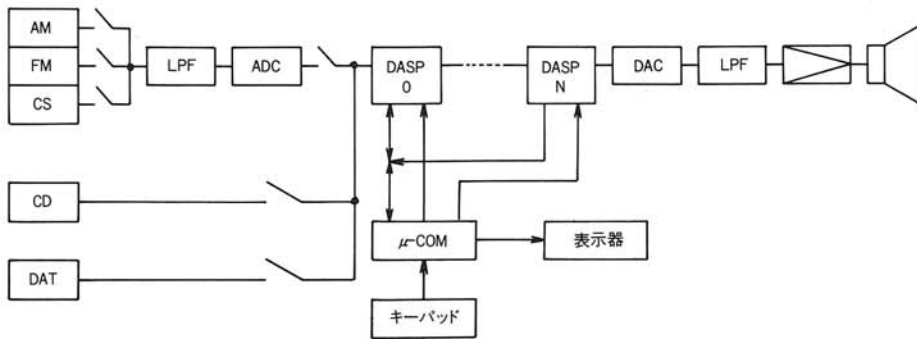


図-3 システム構成図

Fig. 3 Configuration of audio system.

れている。

さて、マイコンがオーディオ機器に与えた影響を整理すると

- ① 制御精度の向上 ←メカニズムの簡略化
- ② 意匠の自由度拡大 ←見映えの重点
- ③ 操作性の向上
- ④ 機能の拡大 ←付加価値の向上

である。

一方、オーディオ信号の処理は、車室内の周波数特性を均一化するフィックス・イコライザ、音楽ジャンルに適した音質制御をするサウンド・フレーバーなど多様化しつつある。

マイコンと同様に、プログラムによって高品質にオーディオ信号処理を実現する手段が求められてきた。⁶⁾

3.2 DASP開発のねらい

音楽のメディアはLPレコードからCDへ急速

に転換した。更にDATにより民生レベルで高品質な録音が可能になった。ディジタル化されているオーディオ信号は、アナログ信号に復することなくディジタル信号のまま音として再生されることが最も望ましくコスト/パフォーマンスの優れたシステムを構成できる。

図-3は、DASPを適用したオーディオ・システム構成図である。このDASPの開発のねらいは、下記のようにした。

- (1) 機能・性能をソフトウェアにより実現することにより多品種少量生産時代に対処する。
- (2) ハードウェアの簡略化、小型化を図る。
- (3) 各装置のディジタル・インターフェース化を推進する。

このねらいを実現するDASPの基本的な条件は表-4であり、ハードウェアの開発コンセプトは以下の通りである。

表-4 DASPの本条件基

1. インターフェース	① アナログ入力 …… A/Dコンバータ経由 ② デジタル入力 …… CD、DTA、衛星放送 ③ デジタル出力 …… チャンネル数 (Max8, 8スピーカー対応) ④ ヒューマン・インターフェース …… 制御用マイコン
2. 処理サイクル時間 (リアルタイム処理)	① 外部データ・サイクルに同期 ② デジタル入力 …… fs: 32 kHz, 44.1 kHz, 48 kHz
3. 演算方式 (繰返演算精度の保証)	① 浮動小数点方式 (18E6) ② オーバーフロー/アンダーフローの防止
4. システム構成	① マルチ・チップ構成 ② インターフェース …… EIAJ CP-340

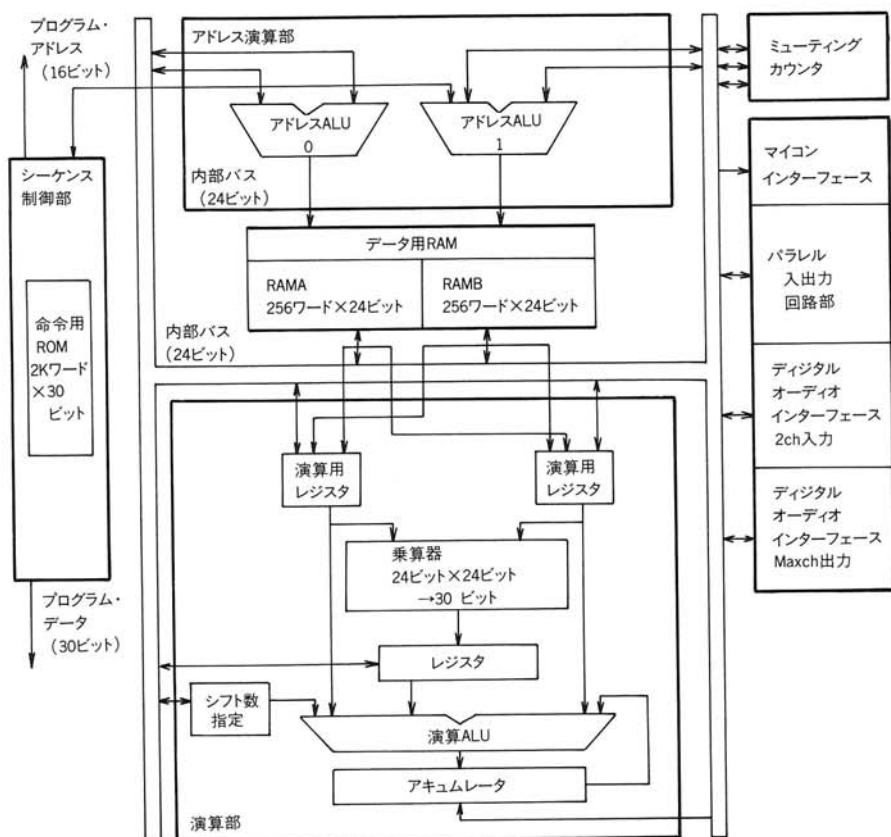


図-4 DASPのブロック図

Fig. 4 DASP block diagram.

- ①信号処理系と制御系インターフェースの簡素化を図る。
- ②高速処理の実現で多様な処理に対応する。
- ③浮動小数点演算方式による高性能化を図る。^{脚注 5)}
- ④マルチチップ構成を容易にし多機能化等を実現する。
- ⑤多チャンネル出力 (Max8) を図る。

(4または8スピーカに対応)

以上を基本に、当社はDASP開発を行った。

脚注 5)

浮動小数点演算方式：浮動小数点フォーマットで演算すること指数部が変化出来る範囲において、仮数部の有効ビット長が保たれ、高精度演算が可能である。

(表紙裏のグラビアおよび本誌論文デジタル・オーディオ・シグナルプロセッサ P13参照)

さらに、DASPはソフトウェア(アルゴリズム)により機能を実現するため開発支援ツールが不可欠であり並行して開発した。

(本誌論文ハードウェア開発支援ツール P23参照)

4. DASPの応用

DASPの基本構成を図-4に示す。⁷⁾

このDASPは、内部にプログラム格納用メモリ、データ格納用メモリ、算術演算回路および制御回路を持ち、プログラムすることにより1チップで目的のデジタル信号処理を実現できる一種

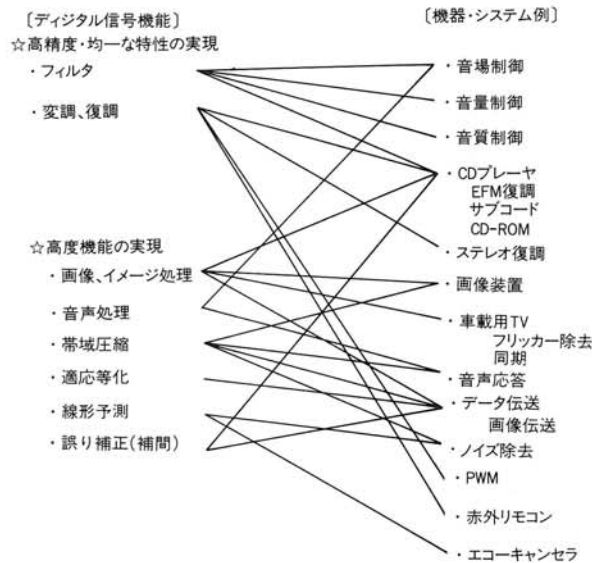


図-5 DSPで実現できる機能と応用例
Fig. 5 DSP functions and applications.

の1チップ・マイクロ・プロセッサである。特徴は、乗算器の内蔵であり、乗算器と累算器(加算器)のパイプライン・アーキテクチャ^{脚注 6)}により高速演算処理を実現している。

DASPは、アナログ信号処理の抵抗(R)、コンデンサ(C)、コイル(L)および増幅器などで構成した変復調器、フィルタ、波形整形器等をプログラムに置き換えることが可能である。

(本誌論文ディジタルフィルタとイコライザ P 43 参照)

更に、アダプティブ・フィルタなどアナログ技術では困難であった回路を高精度、高安定に実現できる。図-5は、DSPで実現できる機能とその代表的な例を関連付けたものである。

さて従来、オーディオ機器におけるオーディオ信号処理は、「原音に忠実な音の再生(Hi-Fi)」に最大の目的がおかれていた。ディジタル

・オーディオ化が進んだ今日、高品質なソースが容易に得られるようになった。

次の課題は、車室内という狭い空間(3~4 m³)にコンサートホール、教会、映画館、ライブハウス等のような広い空間を創造することである。これを、音場制御と呼んでいる。^{8), 9), 10)}

私達は音を聞く時、楽音、音声などの生の音を聞いているのではなく、音が伝わってくる空間のハーモニー(調和)あるいは不協和された響きを持った音を聴いている。すなわち、音は伝達され

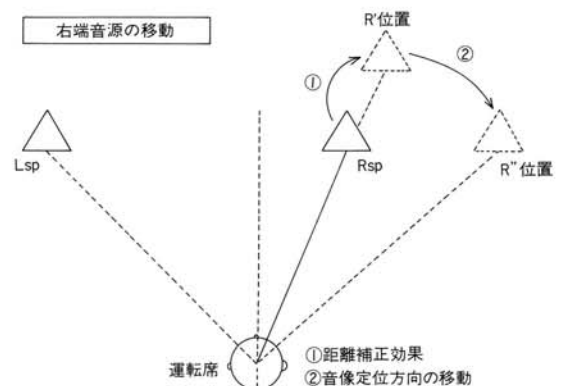


図-6 音像制御の概念
Fig. 6 Sound image control.

脚注 6)

パイプラインアーキテクチャ：演算処理をいくつかのステップに分解して、おのおの異なるハードウェアで実行する構成。

表-5 DASPで実行できる主な機能

機能 \ モード	A M	F M	TV(音)	カセット	C D	DAT
トーンコントロール	○	○	○	○	○	○
イコライジング	○	○	○	○	○	○
疑似ステレオ	○		○			
音場制御	○	○	○	○		○
音像制御		○		○	○	○
E FM復調、誤り訂正					○	○
ノイズ リダクション	○	○	○	○	○	

る音場（空間）によって作られる。

この音場を解析し、演奏空間と等化になるように立体的な響きを創造すれば、車室内でもコンサートホールと同じような音場が実現出来る。

（本誌論文車室内音場制御と音場解析 P33参照）

当社は、DASPにより音質劣化させることなく「臨場感を再現」する音場制御装置「サウンド・プロセッサα5000P[®]」を開発した。

（表紙裏のグラビアおよび本誌論文DASPの応用製品 P63参照）

また、車室内では受聴点（座席の位置）とスピーカの位置関係が、標準ステレオ聴取に対して左右非対称である。この非対称であるスピーカ・レイアウトを図-6のようにRから聞こえる音をR¹¹⁾から聞こえるように、遅延量、位相角、音圧レベルをDASPで制御する。これを音像制御という。

音像制御は、車室内でリスニング・ルームと同じように標準ステレオ聴取で音楽を楽しむことができる。

さらに、当社はDASPを表-5のようにオーディオ・ソースに適応した機能を実現し製品に活用していく。

SP・ASICである。これは、A/D、D/A、CDなどのデジタル・オーディオ・インターフェース（EIAJ CP-340^{脚注 7)}）やユーザの操作を演数係数に変換しDASPに伝送するマイコン・インターフェース回路などを内蔵している。このためDASPの周辺回路は、コンパクトにすることができた。

演算部は、浮動小数点演算（18E6）を採用し16ビットのデジタル・オーディオ信号に対して十分な精度を確保した。

このDASPを十分に生かすためには、AM/FMチューナ、カセットテープなどのアナログ信号をデジタル信号に変換するA/D変換器やデジタル信号をアナログ信号に変換するD/A変換器の精度も重要である。

従来のA/D変換器は、高精度な受動素子（R、C）を数多く必要とする逐次比較方式であり、小型化、低コスト化が困難であった。このためA/D変換器は、アナログ部を極力簡単にしデジタル・フィルタで所望の分解能を得る $\Delta\Sigma$ 変調方式^{12), 13)}に移行しつつある。

$\Delta\Sigma$ 方式は、アナログ回路が少なく大部分がデジタル回路であるため下記の利点がある。

脚注 7)

EIAJ CP-340：日本電子機械工業会デジタルオーディオ・インターフェース規格

5. DASPと周辺LSI

DASPは、オーディオ信号処理に特化したD

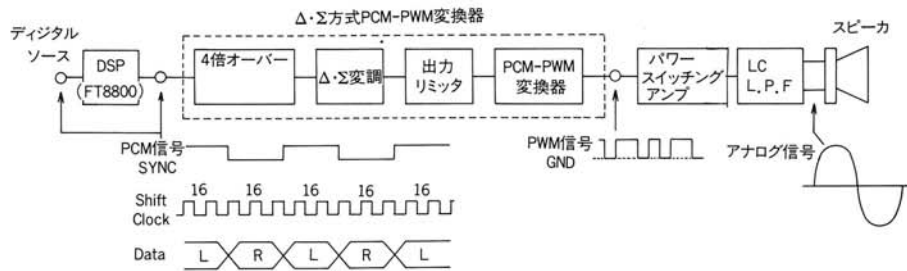


図-7 デジタルアンプ構成
Fig. 7 Configuration of digital amplifier.

- ①直線性がすぐれている。
- ②無調整で高精度が得られる。
- ③温度、経年変化がほとんど無い。
- ④LSI (ASIC) 化が容易である。

この Δ - Σ 方式は、オーバーサンプリングとディジタル・フィルタ技術を用いる。 Δ - Σ 方式A/Dは入力信号を高い周波数で1ビット量子化（この部分のみアナログ）しディジタル・フィルタで低い周波数の高分解能Nビットに変換する。

（本誌論文 Δ - Σ 変調型A/Dコンバータ P53参照）

また、 Δ - Σ 方式D/AはNビットの入力データをディジタル・フィルタでオーバーサンプリングを行い、ノイズシェーピング回路によりn倍オーバーサンプリングの二値データに変換し、さらにPulse Width Modulation（以下PWM）変換し、分解能力が数ビットのPWM出力としてD/A変換する方式である。

Δ - Σ 方式PCM/PWM変調器を使用したディジ

タルアンプの構成を図-7に示す。このディジタルアンプはスピーカをスイッチング動作で駆動するため高能率、低熱損失であり、大出力が実現可能である。

これにより、CD、DATのディジタル・ソースの場合、またアナログ・ソースのA/D変換以後、スピーカ駆動まで全てディジタル化された高性能なシステムが構築できる。

6. 将来展望

今後のオーディオ機器および自動車用機器におけるDSPの応用について考察する。

まず、周辺LSIのアナログ部が前述のようにディジタル化されると、アナログ回路は簡略化でき高周波段もディジタル処理が可能になる。

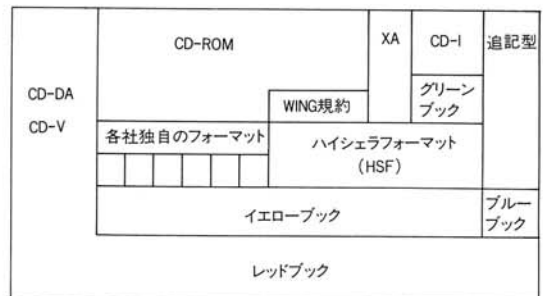


図-8 コンパクト・ディスクの展開
Fig. 8 Development of compact discs.

脚注 8)

オーバーサンプリング：ナイキストの定理で必要なサンプリング周波数(f_s)より高い周波数 nf_s でサンプリングすること。

脚注 9)

ノイズシェーピング回路：ディジタル化した時に発生する量子化雑音を高い周波数に偏って分布させること。

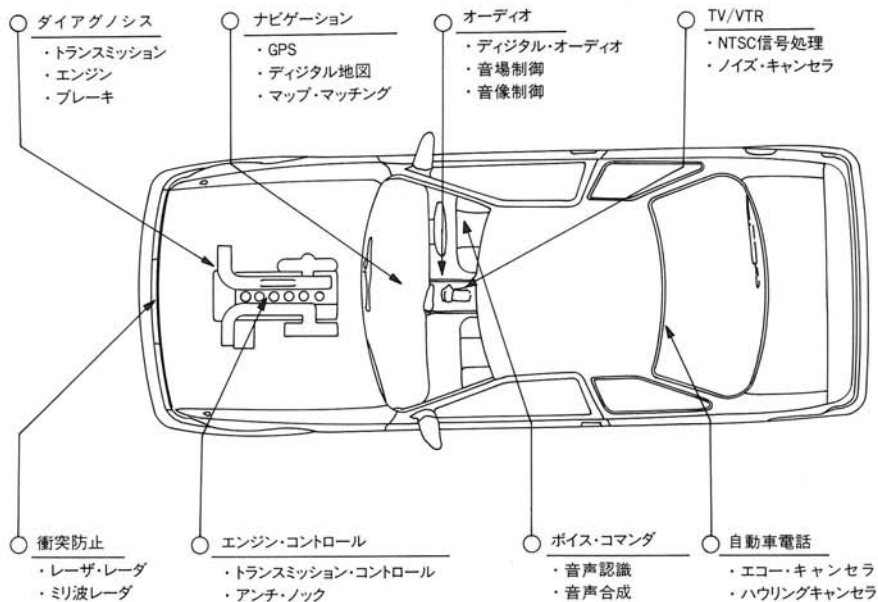


図-9 自動車へのDSPの応用

Fig. 9 DSP applications in a car.

例えば、AM/FM チューナは、従来のスーパーヘテロダイン方式から脱却しダイレクト検波でも十分に性能を確保できるようになる。¹⁴⁾

また、DSPはオーディオ信号の加工処理のみならずCD、DATの誤り訂正などにも活用されている。しかし、CDは単に音楽用のみならず動画信号を内蔵したCD-V、ナビゲーション用デジタル道路地図データ、データ・ベースを記録したCD-ROMなど図-8のように多様な展開が進められている。このデータ化された信号の復調、例えばADPCM¹⁰⁾の伸長、画像符号のデコードなどDSP技術は不可欠である。

一方、自動車電話は、安全上ハンズフリーが望ましく最近、自動車に搭載されはじめた。

このハンズフリーにおけるスピーカからマイク間

で発生するハウリングは、搭載の障害となっている。適応型デジタル・フィルタは、外部環境に適応してフィルタの係数を変化させ不要な信号を取り除く働きをする。これは、ハウリング・キャンセラやエコー・キャンセラに活用できる。¹⁵⁾

新しい分野として、自動車の前方/後方の距離をセンシングするミリ波FM変調方式のレーダなどの応用がある。これは、ミリ波の電波 f_1 が発射されている時、標的(障害物)からの反射波 f_2 , $3..$ を受信し、両者の差周波数 $f_1 - f_2$, $3.. = f_n$ から標的との距離を算出するものである。 f_n は、標的の数によって複数波ある。この複数波から目的波を検出するためにデジタル・フィルタ¹¹⁾やFFT¹⁶⁾が応用できる。

また、自動車用機器は、急激に電子化されつつ

脚注 10)

ADPCM: Adaptive Differential Pulse Code Modulation 適応差分型パルス符号化変調

脚注 11)

FFT: Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換

あり搭載機器の診断は、目視では不可能になりつつある。機器自身が、自己診断するダイアグノシス機能が、不可欠となった。

DSPは、ダイアグノシス機能を実現するための高速演算器を有しており最適なデバイスである。

ニューロ・プロセッサの概念やプロセッサの処理速度の向上など新しいアーキテクチャが必要である。

以上の他にも、図-9のように自動車へのDSPの応用があると考えられる。機器によって入/出力の条件が異なるため、DASPの固定回路部を最適にASIC化することによりDASPの技術資産をベースにハードウェア、ソフトウェアの開発が比較的容易に展開できると考える。

6. ま と め

DSPの開発動向、当社のオーディオ機器へのデジタル技術の導入経過とDASPの開発、および自動車用機器へのDSPの応用について述べた。

DASPは、アナログ処理では実現が困難であった様々な機能を可能にし、より複雑な信号処理に対処できる期待のデバイスである。

今後、DASPのコアをベースに自動車用機器などに最適なDSPを開発する予定である。

謝辞 本研究開発に当たり、オーディオ信号のデジタル信号処理化に関して、^(株)富士通研究所 川崎研究所 通信処理研究部、コンサートホールなどの音場解析に早稲田大学 音響工学研究室

山崎 工学博士、音質評価などに上野学園大学 音楽学部 藤田 工学博士 にご指導、ご助言を頂きました。

関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島、"デジタル・オーディオの現状と射
来の夢"、JAS Journal, 1988年3月号
- 2) 青山、"符号化方式"、電子情報通信ハンド
ブック、電子情報通信学会 編、pp. 2294-2295
- 3) 小野、"DSPの最新の動向"、第1回DSP
利用技術シンポジウム、pp. 1-9, 1985年
- 4) 持田、雁部、"デジタル信号処理プロセッ
サ"、信学誌7/89, pp. 757-765
- 5) 川上、西谷 "32ビット浮動小数点の積和演算
を 150ns で実行する デジタル信号処理 L S
I"、日経エレクトロニクス no. 402 pp. 195-
220, 1986. 7. 28.
- 6) 拾井、"デジタル・プロセッシング・ブリ
アンブ"、JAS コンファレンス '88予稿集、
pp. 184-187, 1988年10月
- 7) K. Sako, M. Nagami, and Y. Ito, "Develop-
ment of a Digital Signal Processor (DSP)
for Audio Equipment" SAE80257 (1980)
- 8) 本島、長野、高島、伊藤、"デジタル信号
処理を用いた車室内音場制御の検討"、電子情
報通信学会全国講論集A-175, 1989年3月
- 9) T. Chono, T. Ito, and S. Fujimoto,
"Sound Field Control in Car Compartment"
SAE880235 (1988)
- 10) 高野、加藤、岡部、"次世代オーディオの萌
芽、音場制御"、日経エレクトロニクス、no.459,
pp. 99-115, 1988. 10. 31
- 11) 大和、高島、伊藤 "車室内における非対音場
の改善方法"、日本音響学会講演論文集、講演
番号 1-5-14, pp. 357-358, 1988年3月
- 12) T. Hayashi, Y. Inabe, K. Uchimura, and
T. Kimura "A Multistage Delta-Sigma

- T. Kimura "A Multistage Delta-Sigma Modulator without Double Integration Loop", ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 182-183, (1986)
- 13) Y. Matsuya, K. Uchimura, A. Iwaya, T. Kobayasi, and M. Ishikawa, "A 16b Oversampling A/D Conversion Technology Using Triple Integration Noise Shaping" ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 48-49, (1987)
- 14) D. Ehrhardt, "Digital Processing of RF Signals", ITT Intermetall, Freiburg, West Germany, (1989)
- 15) 岩垂、布田、佐野、"自動車電話用エコーキャンセラの開発"、電子情報通信学会春季全国大会講演集、B-559 1989年
- 16) T. Takehana, H. Iwamoto, T. Sakamoto, T. Nogami "Millimeter-Wave Radars for Automotive Use", IEEE&SAE Convergence '88
- 17) 平井、"ニューロプロセッサ"、信学誌、Vol. 72 No 7, 7/'89, pp 750-756