

車室内音響チューニングシステム

UDC 681.534 : 629.113

Acoustic Optimizing System in Car Compartment

小脇 宏 *Hiroshi Kowaki*
山口博之 *Hiroyuki Yamaguchi*
加藤茂樹 *Shigeki Katou*



要 旨

車載用オーディオシステムの音響検討効率の向上を目的として、我々は当社の持つDSP(Digital Signal Processor)の技術を応用し、高音質で多岐に渡った音響検討が可能な車室内音響チューニングシステムを開発した。このシステムは、従来アナログの複数機材で行っていた機能を一体化し、さらに多くの処理をデジタル化したもので、音響調整機能に加え音響測定・解析機能も搭載している。このシステムによって、(1)ほとんど全ての制御をパソコンで行うことができるので、作業の効率化が図れた、(2)信号処理がデジタル化されたので、検討時の音質が向上した、などのメリットが得られた。

本稿では、このシステムの概要と開発の目的、開発内容などについて紹介する。

Abstract

We developed the acoustic optimizing system to achieve efficient acoustic experiments on the car audio systems. Our own technologies on DSP(Digital Signal Processor) and HATS(Head And Torso Simulator) are used in this system which is able to make high quality and various acoustic experiments. In this system, we combined functions managed by several analog instruments into one body and changed the method of signal processing from analog to digital.

This system has the acoustic measuring and analyzing functions in addition to the acoustic adjusting function. This system brings following advantages,

- (1)The efficiency of acoustic experiments is improved because we can control almost all functions by the computer.
- (2)Sound quality while evaluating is improved because the method of signal processing is changed from analog to digital.

In this paper, we report the outline, the purpose of development and the developed items on this system.

1. まえがき

近年のデジタルオーディオの普及に伴い、ホームオーディオだけでなくカーオーディオにおいてもCDプレーヤの装着率は着実に伸びている。これに伴って、カーオーディオの音質も数年前に比べて格段に向上しており、設計者に要求される音質レベル自体も向上してきている。また近年、車は向け先やユーザ層などに応じ、コンセプトを変えながら様々なスタイル、価格帯でつくられており、カーオーディオに関しても、車のコンセプトに応じて個性を持たせた様々な音作りを行うことが求められている。今後、このような要求に対し高い音質レベルを維持しながら短期間で開発を実現していくためには、物理データの有効的な活用や音質調整作業の見直しなどによって音響設計の効率化を図っていく必要がある。

そこで、今回我々は、

- 1) パソコンによる音響調整作業効率の改善
- 2) DSPによる高音質・多機能化及び処理の高速化を主眼とした音響チューニングシステムの開発を行った。

以下このシステム開発に関して、開発の背景を踏まえながらその内容や効果などについて述べる。

2. 開発の背景

2.1 当社の車の音作り

車室内を音響的にみると、ガラスなどの反射物とシートなどの吸音物が狭い空間の中に隣接して存在し、また、聴取位置に対しスピーカが左右非対称なレイアウトであるというように、通常のリスニングルームと比較すると特殊な音場である。このような空間では音響特性に乱れを生じるため、一般にイコライザなどを用いて音響特性の補正を行う。純正カーオーディオ（特定の車種を対象とした自動車メーカの製品）の場合、車室内の音響特性を事前に知ることができるので、このような音響特性の乱れの補正を仕様の中に織り込むことによって各車種ごとに最適な音響特性を実現することが可能である。

ここで、純正カーオーディオの音作りの流れを図-1に示す。音作りの流れは大きく次の3つのステップに分けることができる。

1) 仕様案画

車のコンセプトを把握した上で、搭載するオーディオシステムの仕様（スピーカ構成など）や性能を決定する。

2) コンポーネントの開発

スピーカ、アンプなどの各コンポーネントを開発

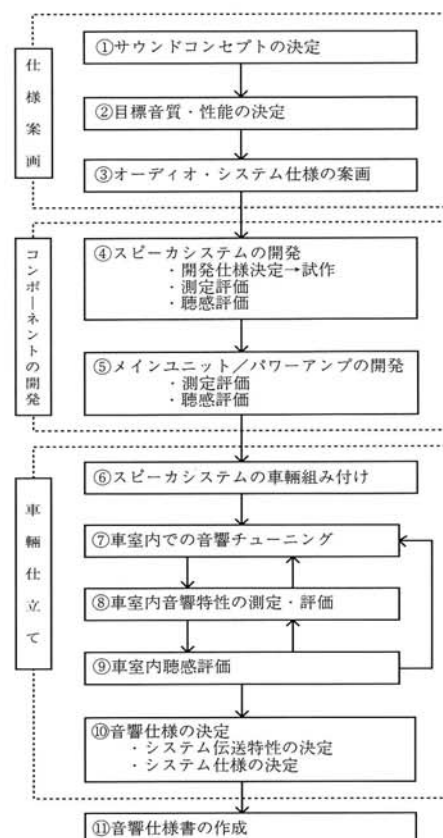


図-1 車の音作りの流れ

Fig.1 General flow of sound creation for car audio

し、ユニット単位で測定・評価を行う。

3) 車両仕立て

各コンポーネントを実際に車に取り付け、音響チューニングを施した後、最終的な測定・評価を行い、システムの仕様を決定する。

この過程の中で、車室内での音の仕立て作業（図-1の⑦→⑨の部分）は最終的に仕上がる音質に対する影響が大きいので、多くの時間をかけている。ここで行われる音響チューニングとは、各スピーカから出力される音のレベルバランス、イコライザ特性などを調整することによって、車室内の音響特性の乱れを補正し、車のコンセプトに合った音響特性を実現することである。音響チューニングは車室内で測定した物理データをもとに行われるが、物理データだけで実際の音質を判断することはできないので、物理データによる評価と聴感評価を繰り返し実施して仕様を決定している。

2.2 従来の問題点

こうした車両音響仕立てを行う際、従来は以下のような問題があった。

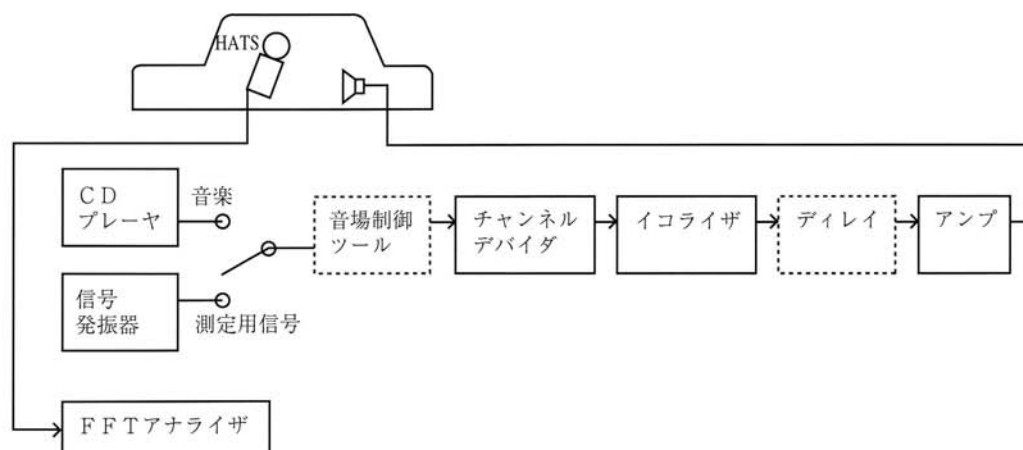


図-2 従来の音響チューニングシステム・ブロック図

Fig.2 Block diagram of the conventional acoustic optimizing system

1) 音響チューニングの作業効率について

- ①多数のハードを接続して使用していたため（図-2）、実験の準備や操作に手間取っていた。
- ②音響チューニングシステムの規模が大きかったため、車室外にセッティングしていた。したがって、システムの操作は車室外で行わなければならない、パラメータの調整（車室外）、試聴（車室内）を繰り返す際に車への出入りを頻繁に行う必要があった。
- ③イコライザの伝送特性（周波数特性・位相特性）をシステム上で確認できなかったため、イコライザのパラメータを調整中に確認する場合には、その都度イコライザの伝送特性の測定を行う必要があった。したがって、伝送特性を随時確認することは困難であった。
- ④カーオーディオの信号処理部のデジタル化が進むにつれて、音場制御、遅延処理など新しいチューニング要素にも対応する必要が生じてきている。しかし、このような要素と従来の要素を一括して制御することは難しいため、音響チューニングシステムの規模は増大し、作業はより複雑化する傾向にある。

2) 音響チューニングシステムの音質について

音響チューニングに使用しているハードは全てアナログ機器であった。これらは個々のハードとして音響的に十分な品質を持っているが、CDの普及によってソース自体のクオリティが向上してくると、複数のハードの接続から生じる信号の劣化（音質劣化）が無視できなくなり、高いクオリティを持つ製品の微妙な音質評価が難しくなってきた。

2. 3 開発の目的

これらの問題点を考慮し、本システムの開発目的を以下のように定めた。

- 1) 音響チューニングの効率化を図る。
- 2) 音響チューニングシステムの音質を向上させ、当社の音質評価水準の向上を図る。

また、各問題点を解決するための具体的な改善策は以下のとおりである。

- ①音響チューニング用の複数のハードを一体化することによって、ハードを小型・軽量化するとともにハード間の接続を簡素化する。
- ②全ての機能をパソコンで制御できるようにし、操作性の向上を図る。また、ノートパソコンを用いることによって、車室内での操作を実現する。
- ③イコライザの伝送特性をパソコン画面上に表示させることによって、伝送特性の確認を容易にする。
- ④信号処理を全てデジタル化することによって、伝送系での信号劣化を最小限にとどめ、音質を向上させる。

3. システム概要

ここでは、今回開発したシステムの概要について述べる。

3. 1 システムの全体構成

本システムは、次の三つのハードから構成されている。（これらを含むシステムの全体構成を図-3に示す）

- 1) システム本体
- 2) パソコン
- 3) HATS（Head And Torso Simulator）

本システムで実現できる機能には、大きく分けて音響

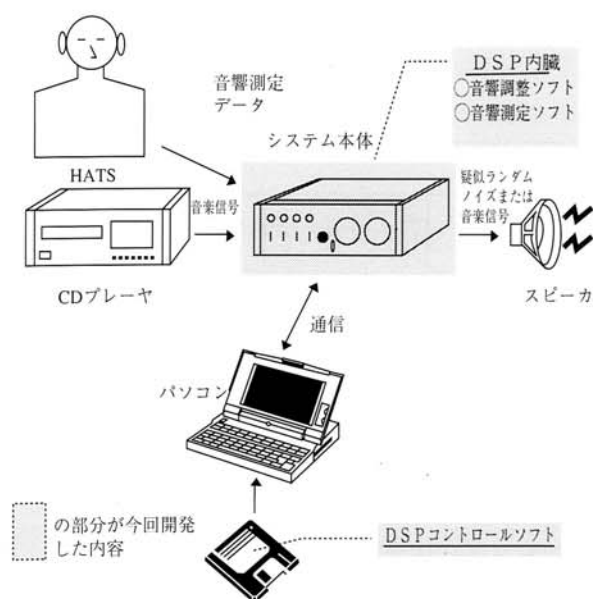


図-3 音響チューニングシステムの全体図
Fig.3 Structure of the new acoustic optimizing system

測定機能（車室内周波数特性などの測定機能）と音響調整機能（イコライザなどの音響特性調整用機能）の二つがある。この機能を実現するための信号処理はシステム本体で行っており、使用目的に応じて内部の動作を切り換えることができる。例として、音響チューニング時のシステム本体内部の動作と接続ブロックを図-4に示す。図に示すように、従来使用していたFFT（Fast Fourier Transform: 高速フーリエ変換）アナライザ、イコライザに相当する機能をシステム本体内部で実現していることに加え、パワーアンプも内蔵しているので、ハードの接続が大幅に簡素化されている。また、図中のパソコンを車室内に持ち込むこともできるので、車室内で音楽を試聴しながらパラメータの調整を行うことができる。

音響測定を行う際には、收音用としてHATS（胴体付きダミーヘッドのことで、外耳道の入り口にマイクが備えられている）を用いる。

3. 2 個々のシステム概要

次に、システムを構成する個々のハードの概要について説明する。

3. 2. 1 システム本体

システム本体には、DSP、ADコンバータ、DAコンバータやパワーアンプなどが内蔵されている。これらを含むシステム本体の主な仕様を表-1に示す。音響測定機能などを実現する信号処理・演算はDSPで行っているため、信号の劣化はほとんど無く、従来に比べ音質が

大きく向上している。

また、システム本体の設計に際しては、音響検討の効率化に加えて音質評価や各種実験用としてできるだけ多くの状況で使用できるよう、汎用的な仕様とすることを考慮した。特に留意した内容は次のとおりである。

- 1) 音源（CDプレーヤ等）とスピーカ以外の必要な機能はすべて内蔵し、機材の軽減と簡素化を図る。
- 2) 外部デジタルシステムとの接続も考慮して、入出力にはデジタルインターフェースも設定する。
- 3) システムの電源はAC100VとDC13Vの2系統とし、ベンチと車室内両方で使えるようにする。
- 4) 操作は出来る限りパソコン上で行えるようにする。

3. 2. 2 パソコン

パソコンはDSP制御用で、内部に専用のソフトを内蔵している。DSPの制御内容としては、例えば、測定条件の変更、イコライザのパラメータの変更といったものがある。その場合、一つのパラメータを変更する度に必要な係数を計算してDSPの内部アドレスに設定する、という複雑な処理が必要となる。パソコン内部のDSPコントロールソフトでは、こういった計算や処理を自動的に行い、ユーザにとっての使い勝手を向上させている。また、パソコン上での操作は基本的にカーソルキーとリターンキー及び数字入力のみで行えるようにし、初めてのユーザでも簡単に操作できるような仕様になっている。

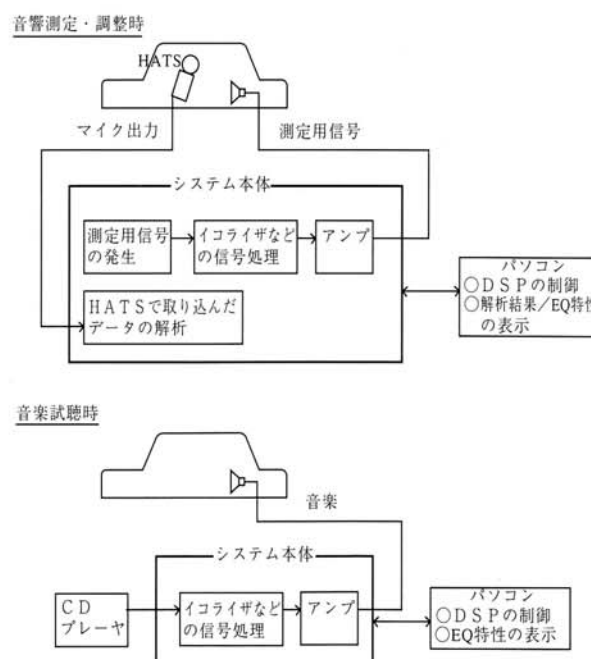


図-4 音響チューニングシステムの動作概要及びブロック図
Fig.4 Block diagram of acoustic optimizing system

3. 2. 3 HATS

HATSはコンサートホールの音場解析やエンジン音などの評価、あるいはバイノーラル録音・再生など、音響分野で広く用いられている。HATSは人の頭部及び胸部伝達関数が模擬されているため、通常のマイクよりも聴感と相関の高い物理データを得ることができ、聴感による評価の度合いが軽減される。

4. システムの機能

ここでは、本システムの機能（音響測定機能、音響調整機能）について詳しく説明する。

4. 1 音響測定機能

本機能はHATSの置かれた位置の音響特性がどのような特徴を持つのか分析するためのものであり、音響測定用信号の発生や解析はDSP内部のプログラムで実現している。図-5にそのプログラムフローを示す。このうち特にFFT解析は、DSPを用いることによって演算の高速化を実現している。以下、音響測定用信号及び測定項目（周波数特性、時間応答）の内容について説明する。

4. 1. 1 音響測定用信号

音響測定用信号としてはM系列信号（Maximum-length sequence signal）を使用している。M系列信号は疑似ランダム信号であり、再生するM系列信号と被測定音場内（車室内など）の応答との相互相関をもとに被測定音場のインパルス応答を求めることができる。従来使用していたホワイトノイズなどの測定用信号と比較して、ノイズの影響を受けにくいという特徴を持つため、S/Nの

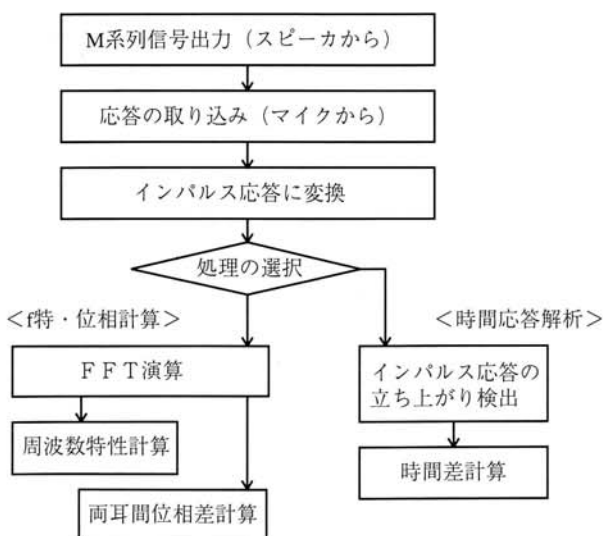


図-5 DSP内蔵の音響測定プログラムフロー

Fig.5 Flow chart of acoustic measurement program inside DSP

表-1 システム本体のおもな仕様

入力	アナログ入力	1系統（2ch）
	デジタル入力 （A/Dコンバータ変換方式）	1系統（2ch） 16bit分解能 4次ΔΣ方式 64倍オーバーサンプリング出力
出力	アナログ出力 ○プリ出力 ○パワー出力	3系統（6ch）（4.1Vrms） 6ch（30W×6）（4Ω負荷時）
	デジタル出力 （D/Aコンバータ変換方式）	3系統（6ch） 18bit分解能 1bit方式
DSP仕様	演算精度	18E6 × 18E6 = 24E6
	サイクルタイム 入力データビット長 出力データビット長 DSP本体内部数	60nSec 16bit 18bit 3個
電気的特性	全高調波歪率 ○プリ出力 ○パワー出力 ダイナミックレンジ	0.005%以下（OdB, 1kHz） 0.05%以下（1W, 1kHz）
	○デジタル出力 ○プリ出力 ○パワー出力	110dB 104dB 84dB
電源	2電源方式（AC100V/DC13V）	
外形寸法	430mm（幅）×140mm（高さ）×300mm（奥行）	
重量（約）	7.2kg	

点で有利である。また、このM系列信号はシステム本体内のDSPから発生するため、従来のように外部の信号発振器などを接続する必要がなくなった。

4. 1. 2 周波数特性の解析

周波数特性は、車室内の音響特性を解析する上で最も基本的な測定項目である。以下に示すような種類のデータの測定、表示が可能である。（図-6）

- ① 1/3 オクターブバンド周波数特性
- ② 1/3 オクターブバンド・スweep周波数特性
- ③ 低域・中域・高域のバランス
- ④ 両耳間位相差

この中で、市販のFFTアナライザにない独自の解析項目は②と③である。周波数特性の評価には①を用いるのが一般的であるが、②では、①よりも周波数分解能を高めるために、FFT後の周波数特性上で1/3 オクターブバンド幅のバンドパスフィルタを20Hzから20kHzまでスweepすることによって算出している。この手法を用いることによって、従来よりも解析精度が向上し、イコライザのパラメータ（中心周波数、Q）設定もより正確に行えるようになった。また、③については図-6に示すように全帯域を3分割して解析するので、全体のバランスが整っているかどうか確認しやすくなった。

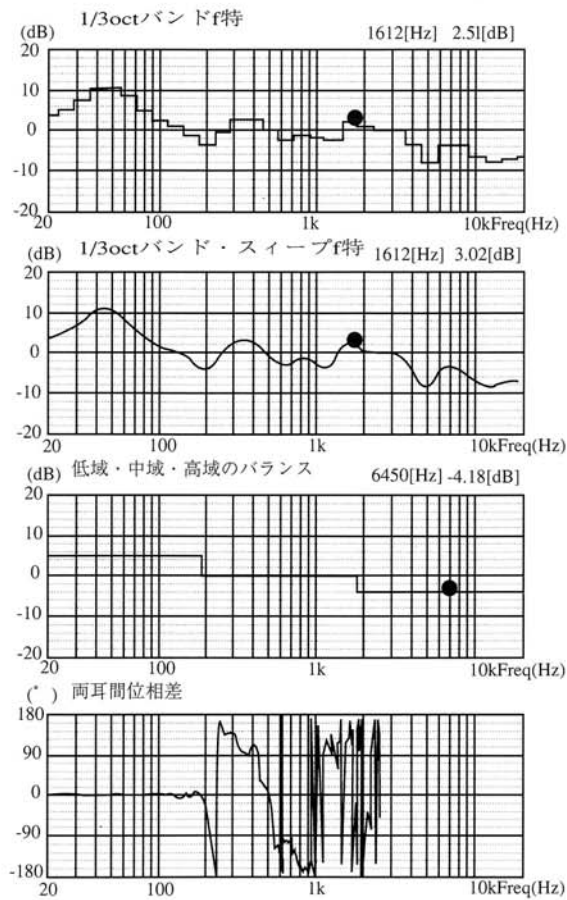


図-6 測定データの表示例

Fig.6 Example of measurement data

4. 1. 3 時間応答の解析

時間応答の解析は、音が車室内での反射や回折を経て耳に到達する様子を時間軸上で観察するために行う。解析項目は次のとおりである。

①インパルス応答

②音がスピーカから耳に到達するまでの時間

この中で②は今回新しく開発した解析項目である。以下、その必要性や内容について説明する。

一般に、車室内では聴取位置から各スピーカまでの距離が異なるために、音像定位の偏りや位相のずれが生じる。アナログシステムではこの現象を補正することは困難であったが、デジタルシステムでは信号の遅延時間を調整することによって補正することができる。②では、インパルス応答測定後、その立ち上がりから時間差を検知して画面に表示するので、次に述べる音響調整機能の中の遅延時間調整機能を用いることによって、定位補正を簡単に行うことができる。

4. 2 音響調整機能

本機能は、先に述べた音響測定機能による解析結果をもとに所望の音響特性に調整するためのものであり、音響チューニングを行う上で必要なイコライザ、ディレイなどの機能を搭載している。これらの機能はDSP内部で実現しており、図-7に音響測定を含む信号処理の概要を示す。図に示すように、音響測定を行う時には測定用

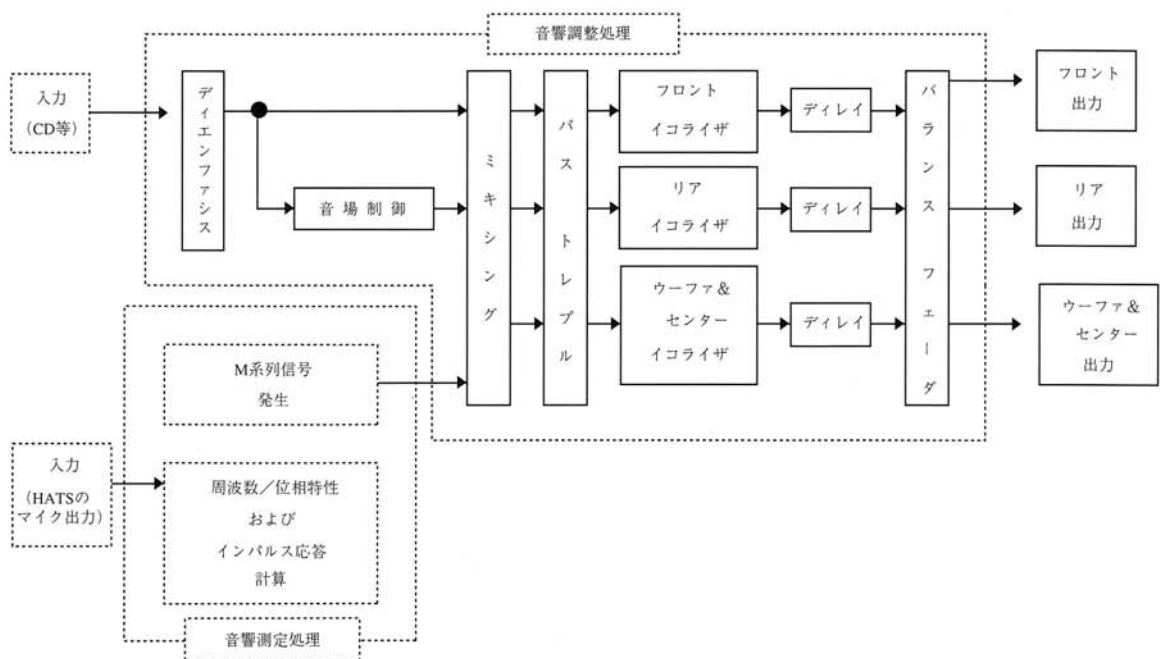


図-7 DSP信号処理内容の概要

Fig.7 Outline of digital signal processing

表-2 DSPのおもな音響処理機能

音響調整機能	オーディオ基本機能	1次巡回型フィルタ 3素子 × 2ch
	周波数特性調整機能	1次巡回型フィルタ 1素子 × 6ch
		2次巡回型フィルタ 8素子 × 2ch
		5素子 × 2ch 1素子 × 1ch
	音場制御機能	初期反射音・残響音生成
		2次巡回型フィルタ2素子(残響音質調整用) 1次巡回型フィルタ2素子(初期反射音調整用)
	ディレイ	6ch(最大遅延時間:5mSec)

信号がイコライザなどの処理部を経由し、CDなどの音源を再生する時にはCDの出力信号が同じ部分を経由する構成となっている。また、図-7の各ブロックの処理内容を表-2に示す。ここで示されている巡回型フィルタとは、IIR(Infinite Impulse Response) フィルタと呼ばれるもので、図-8のa0～b2で表されている部分の係数値を変更することによってさまざまな形のイコライザカーブを実現することができる。今回開発したDSPの仕様では、個々の巡回型フィルタについてそれぞれ表-3のタイプのイコライザカーブを実現できる。同様に音場制御機能や音響信号遅延などでも、特定の処理にとらわれることなく、任意の音響処理を簡単に施し、また変更することが可能である。このような仕様は、作業を行う上での操作性・効率を従来よりも高めている。

一方、パソコンの画面上では、音響調整機能は大きく次の7つに分類してあり、それぞれを1つの画面で制御出来る仕様となっている。

①システムの初期設定

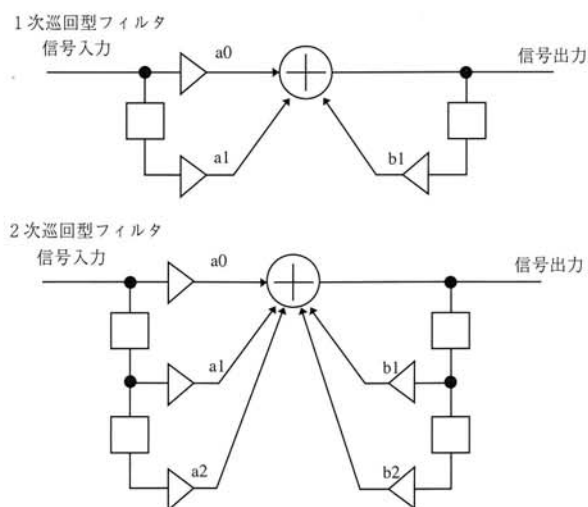


図-8 巡回型フィルター

Fig.8 IIR Filter

表-3 巡回型フィルタで実施可能な音響処理内容

	可能な音響処理内容 (調整可能なパラメータ)
1次巡回型フィルタ	1次ローパスフィルタ (周波数) 1次ハイパスフィルタ (周波数) 1次フェーズシフタ (周波数) バス (周波数・ゲイン) トレブル (周波数・ゲイン)
2次巡回型フィルタ	イコライザ (周波数・ゲイン・Q) 2次ローパスフィルタ周波数・ゲイン・Q) 2次ハイパスフィルタ周波数・ゲイン・Q) 2次フェーズシフタ周波数・Q) + 1次巡回型フィルタで可能な内容

Frequency-Specification Control

DEEMPHASYS:OFF

グラフ表示: 表示開始 ("return" でグラフ表示開始)

チャンネル: FRONT ("return" でFRONT/PEAR切り換え)

LR動作: 独立 ("return" で独立/同時切り換え)

パラメータ	Bass	Trebl	Mid	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8
L ch	f _c (Hz)				700	3000		50	1000		
	Gain (dB)				3.0	6.0					
	Q	---	---		1.5	2.0			2.0		
	EQ-TYPE					1		6	4		

LR共通

← → 44.1kHz →

動作時のみ

→ フロントのみ

(EQ4～9のみ)

パラメータ	Mid	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8
R ch	f _c (Hz)		200	700		50	800		
	Gain (dB)		-4.0	3.0				2.0	
	Q		1.0	1.5					
	EQ-TYPE					6	4		

(TYPE=0の時は空白表示)

EQ TYPE										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GEQ	PEQ	2次LPF	2次HPF	2次PS	1次LPF	1次HPS	1次PS	1次BASS	1次TREB	THROUGH
1:701	初期設定	LOAD	1:701	1:701	701:1	701:1	初期設定	SAVE	1:701	1:701

図-9 周波数特性調整画面の例

Fig.9 Example of display for frequency response adjustment

- ②各種定数ファイルのロード
- ③各種定数ファイルのセーブ
- ④各チャンネルのレベル・ミキシング量などの調整
- ⑤周波数特性の調整
- ⑥左右信号間でのクロストークの調整
- ⑦音場制御(初期反射音・残響音)の調整

図-9に例として周波数特性を調整する画面を示す。周波数特性の調整画面に関しては、さまざまな種類のイコライザの組み合わせによって作られた周波数特性と位相特性を視覚的に確認できるように、グラフ表示機能も搭載している。この機能によって、従来のようにイコライザの伝送特性を測定しなくても、パソコン画面上で確認することができるようになった(図-10)。

5. 効果

本システム開発によって、以下の効果が生じた。(従来の音響チューニングシステムと本システムの比較表を表-4に示す)

1) 音響チューニング作業の効率化

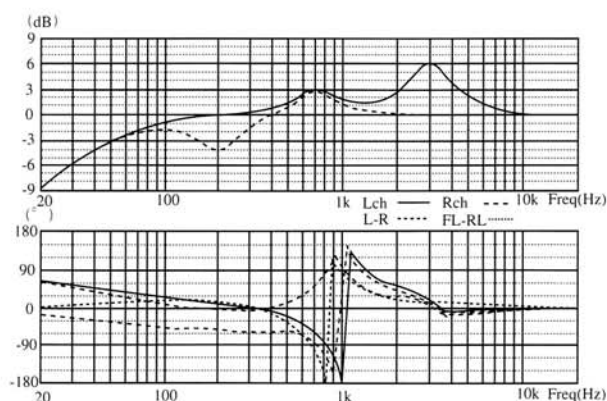


図-10 周波数特性表示の例

Fig.10 Example of frequency response display

音響測定・調整作業を全てパソコン上で制御できるようになり、操作性が向上するので、音響チューニング作業の効率化（約30%削減）が図られた。また、以下に挙げる効果も生じた。

- ①車室内にパソコンを持ち込むことが可能なので、車室内でパラメータの調整を行いながら、音楽を試聴できるようになった。これによってパラメータの変化による音の微妙な違いをとらえやすくなり、音質の調整を行いやすくなった。
- ②イコライザの伝送特性を画面上に表示する機能を設けたので、チューニング中に伝送特性を確認できるようになり、イコライザの定数設定も行きやすくなった。

表4 従来の音響チューニングシステムと新システムの比較

項目	従来システム	新システム
ハード関連	ハード構成	イコライザ、チャンネルデバイダ、アンプ、FFTアナライザ、信号発振器、HATS（音場制御ツール、ディレイ）
	信号処理方式	アナログ
	S/N	90 dB
	総重量（HATSは除く）	約4.2 kg
	総容積（HATSは除く）	約0.12 m ³
ソフト関連	各機能の制御方法	各ハード上で個別に制御
	f特解析精度（20~20kHz間のポイント数）	31ポイント [1/3 oct バンド f特測定時]
	その他	従来のシステムにない機能として・イコライザ特性の画面への表示・スピーカから聴取位置までの音の到達時間の自動測定などがある。
音響チューニング方法	車室内で音楽を試聴、車室外でパラメータ調整の二つの作業を繰り返し実施	車室内で音楽を試聴しながら、パラメータを調整

2) 音響チューニングシステムの音質向上

音響調整に関わる信号処理は全てデジタル化したため、システムに起因する信号の劣化は最小限に抑えられるようになった。また、デジタル入力端子を備えているので、CDのクオリティを損なうことがなく、音質が向上した。これに伴って、音質評価精度の向上も期待できる。

3) 音響チューニングシステムの小型・軽量化

従来使用していたイコライザ、アンプ、FFTアナライザ、チャンネルデバイダなどを一体化したため、システムは大幅に小型・軽量化され（従来に比べ重量は1/4、容積は1/6）、実車での実験準備などに対する負担が軽減された。

6. あとがき

以上、音響設計システムの開発内容について報告した。今回開発したシステムには、これまで当社が蓄積してきたDSPに関する技術及び音質評価に関する技術が集約されているが、今後、デバイスや音質評価技術などは更に進歩していくことが予想されるため、必要に応じてシステムの向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 二階堂、山崎：サウンドエンジニアのためのデジタルオーディオ、兼六館出版(1987)
- 2) バーデン・クリステンセン：“音響機器測定に関する応用”、日本音響学会誌46巻8号(1990)
- 3) 伊達、福留、武田：“M系列変換によるインパルス応答の高速計算について”、電子通信学会技術報告EA86-47 (1986)
- 4) 山口、中村、黒崎、加藤：“音質評価用オリジナルCD”、富士通テン技報 VOL.12 No.1 (1994)

筆者紹介



小脇 宏 (コマキ ヒロシ)

1985年入社。以来車載用電子機器の開発を経てデジタル音響システム開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部音響開発課在籍。



山口 博之 (ヤマグチ ヒロユキ)

1990年入社。以来デジタル音響システムの開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部音響開発課在籍。



加藤 茂樹 (カウ シゲノブ)

1979年入社。以来車載用音響システムの研究開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部音響開発課長。

