

空間コントロール技術を用いた クラウンヨタプレミアムサウンドシステム

"Toyota Premium Sound System" for CROWN Using Acoustical Space Control Technology

高	橋	寿	夫	Hisao Takahashi
田	林	準	史	Junji Tabayashi
中	石	信	一	Shinichi Nakaishi
富	田	裕	二	Yuji Tomita
今	村		忠	Tadashi Imamura
蔭	山	雅	義	Masayoshi Kageyama
山	崎	慎	一	Shinichi Yamasaki



要 旨

当社は2008年2月、トヨタ自動車殿と共同でクラウン向け“トヨタプレミアムサウンドシステム”を開発した。このシステムは新規開発した当社独自の“空間コントロール技術”を駆使し、5.1chDVDだけでなく通常の2ch音楽CDでも20畳前後のリビングルームで聴くような拡がり感と開放感のある音場を実現している。本稿では、①開発までの経緯②開発コンセプト③コンセプト実現に用いた技術—空間コントロール技術（不要振動の抑制、不要反射音の抑制、空間情報の付加）、スピーカ・アンプの音質向上技術について述べる。

Abstract

Fujitsu Ten developed "Toyota premium sound system" for CROWN jointly with Toyota Motor Corp. in February 2008. By making full use of "Acoustical Space Control Technology" (hereinafter referred to as "Spatial Control Technology"): newly and originally developed by Fujitsu Ten, this system has achieved the acoustical space with a sense of expanse and open space, as if being in a living room of approx. 30m² when listening to not only 5.1ch DVD but also normal 2ch music CD. This report explains about; 1) development background, 2) development concept, 3) technology to realize the concept - spatial control technology (suppression of unnecessary vibration, suppression of unnecessary reflected sound, addition of spatial information) and technology for sound quality improvement of speakers / amplifiers.

1

はじめに

トヨタ自動車殿における本格的なプレミアムサウンドシステムの搭載は1989年の“スーパーライブサウンドシステム”に始まり、現在はブランドメーカーによるプレミアムサウンドシステムが主流となっている。これらはピュア音質（広帯域、迫力、質感の追求）志向に重点を置いているが、今回のクラウン向けのサウンドシステムでは、トヨタ自動車殿からピュア音質に別の方向性を加え、新しいコンセプトを持ったプレミアムサウンドシステムを開発し、搭載したいとの要望があった。

新たなコンセプトを提案するにあたり、音楽メディアの変遷を見ると、近年DVDの普及に伴ってホームシアタが普及し、音の「サラウンド感」「拡がり感」といった考え方が一般に定着しつつある。当社が実施したプレミアムオーディオ搭載車両のユーザを対象としたアンケートでも「拡がり感のある音」が好まれている結果となった（図1）。

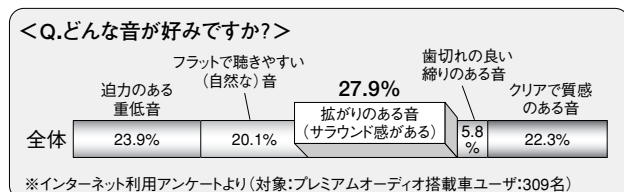


図1 プレミアムオーディオユーザを対象とした音嗜好アンケート結果
Fig.1 Results from Questionnaire on Sound Preferences among Premium Audio Users

拡がり感を提供する従来技術に目を向けると、5.1chのサラウンド技術やDSP信号処理による音場制御技術がある。しかし、車室内環境を考慮した音場制御技術としてはなく、発展の余地が十分にあると考えた。

そこで当社は車室内で広い音響空間を作り出すための音場制御技術の開発に着手した。

2

開発の目的

2.1 サウンドコンセプト

前章の背景から、当社が目指すサウンドコンセプトを「狭い車両空間からの開放」に決定した。目標とする広さは、かつて目標とした「コンサートホール」や「スタジアム」といった音響空間ではなく、ユーザが一般の家庭で音楽を聴き親しんでいる20畳前後のリビングルームとした。これ以上広い音響空間も技術的には実現可能だが、車室内では逆に違和感が生じると考えた。図2に目標とする音響空間イメージを示す。

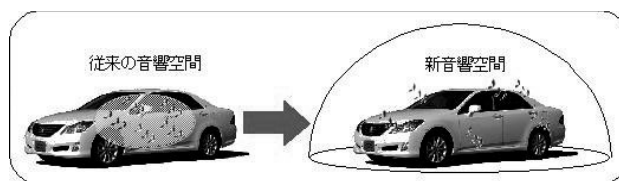


図2 目標音響空間イメージ
Fig.2 Image of Targeted Acoustic Space

2.2 現状（車室内空間）の問題点と解決策（コンセプト実現に向けた方策）

目標とする音の実現に向けて、従来までの周波数帯域の拡大や特性の平坦化だけでなく時間領域での音の減衰の違いにも着目した。図3にて従来の音と目指す音の違いを説明する。

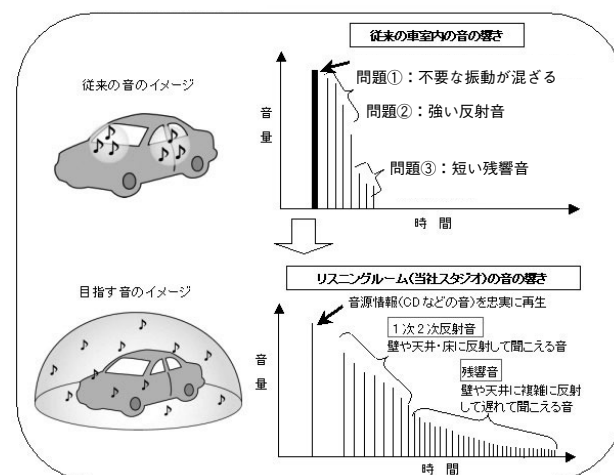


図3 従来の音と目指す音の違い
Fig.3 Difference between Conventional Sound and Desired Sound

従来の車室内の音場にはつぎの三つの問題点があった。
問題①：スピーカからの音に、スピーカ取り付け部周辺（車両側）の不要な振動が混ざる。

→スピーカ再生時にスピーカの振動がボディへ伝播し、不要な振動として放射され、音像がぼける原因になる。

問題②：ガラス・インストルメントパネルからの強い反射音が発生する。

→スピーカから出た音がガラスやインストルメントパネルに反射し、近くに壁があると感じる原因になり、結果として音響空間が狭くなる。

問題③：残響音が天井、シートに吸収されて残響時間が短くなる。

→シートや天井材のような柔らかな吸音面に囲まれているため、極端に残響時間が短くなり音響空間の狭さを感じさせる原因になる。

当社はこれらの問題に対してつぎの具体的解決策を実施した。

解決策①：制振技術による不要振動の抑制

当社独自のスピーカ制振技術を用いた。これは、当社ホームオーディオ用スピーカで培ったTD技術^{注(*)}を車載用スピーカに応用している。

解決策②：逆位相の音による不要反射音の抑制

耳元にスピーカを設置して、そこから逆位相の音を再生して不要な反射音を消す方法を開発した。

解決策③：専用スピーカからの空間情報付加

リスニングルームで発生する反射音を直接音とは異なった位置から再生するという考えに基づき、空間情報用として専用のスピーカを用いた。

当社はこれらの技術を組み合わせたものを次世代「空間コントロール技術」と名付けた。

3**空間コントロール技術**

ここでは、空間コントロール技術を構成する三つの技術①不要振動の抑制②不要反射音の抑制③空間情報の付加の詳細について説明する。

3.1 不要振動の抑制

空間コントロールを行うにあたっては、先ずスピーカから発せられる音そのもののクオリティを高めることが必須である。そのため、2章でも述べた通り、ホームオーディオで培った制振技術を車載スピーカに取り入れることにより、再生音の音像がぼける原因となる不要振動の発生防止に取り組んだ。図4に不要振動抑制前後の波形を示す。従来のスピーカでは直接音の後に不要振動が発生し、音像がぼける原因となっていた。今回採用したTD構造のスピーカでは直接音のみが聴取者に届くため、原音を忠実に再現することができる。

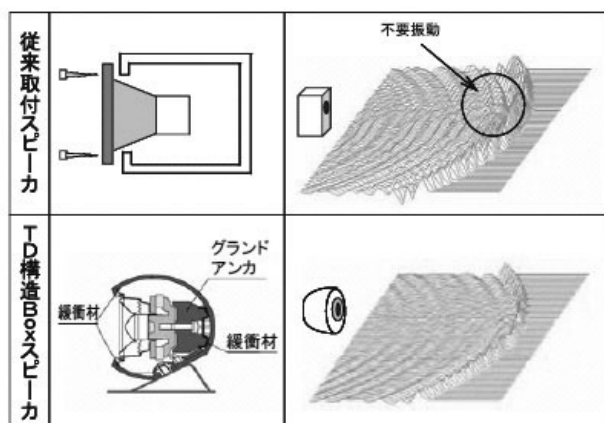


図4 不要振動の抑制

Fig.4 Suppression of Unnecessary Vibration

3.2 不要反射音の抑制

純度の高い直接音であっても、ひとたびスピーカから放射されると車室内のあらゆる箇所から反射の影響を受けた

結果、不要な音が付帯し純度が落ちてしまう。反射音の多くは窓ガラスによるものであることがわかっているが、窓ガラスをなくすことは不可能である。そこで当社は視点を換え、発生した反射音を抑制する手法を取り入れることとした。

図5に示すように音声信号に対し逆位相の信号をぶつけることによりキャンセルする原理を利用する。本システムでは、搭載スピーカの中で反射の影響が特に強いインストルメントパネルに配置したスピーカおよびセンタスピーカからの音をキャンセルの対象としている。

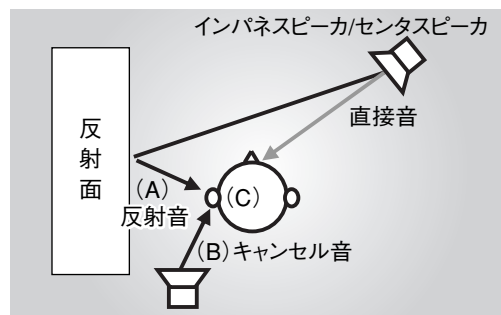
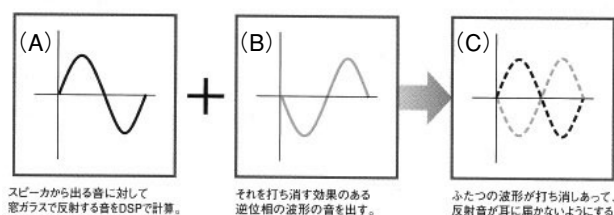


図5 逆位相による不要反射音のキャンセル

Fig.5 Cancellation of Unnecessary Reflected Sound by Antiphase Signal

キャンセル信号はDSPによる信号処理にて生成している。各スピーカから聴取者耳元までの伝達特性をあらかじめ測定しておき、その結果から反射音の成分のみをキャンセルするフィルタ係数を算出した。本システムでは車室内で発生する反射音をカバーすべく、直接音から最大40ms後までの時間に到達する音を制御対象としている。また、キャンセル信号の周波数帯域は1.5kHzを上限としている。波長の短い(=周波数の高い)帯域の音は、例えば聴取位置のずれに対しキャンセル効果を十分に確保することができず、さらには過剰な制御により新たな付帯音を発生させ音質劣化を招いてしまう。そのため、あえて制御をキャンセル効果の大きい帯域に絞込むことにより、キャンセル効果を確保しつつ安定性との両立を図ることができた。同時に、キャンセルフィルタの動作サンプリング周波数を下げることができ、DSP処理量を約1/10と大幅に削減することが可能となった。

キャンセル信号を再生するスピーカは、図6に示すようにシートバック肩口へ搭載した。耳元近傍への設置により、

注(*) TD技術：Time Domain技術

音の時間軸特性を重視し、入力波形をできる限り忠実に再生する技術のこと。

効果的に制御することができるだけでなく、その指向性の中心（音の方向）を聴取者の耳元に向けることが可能となる。これにより、キャンセル信号が周囲の窓ガラスなどにより新たな反射音を発生させることを防ぎ、音質向上を図ることができる。また、個人の体格差が音響性能に影響するため、検討を重ねた末に最適な搭載角度とスピーカの指向特性を導き出した。



図6 シートスピーカ
Fig.6 Seat Speaker

図7に聴取位置における反射音の周波数特性をキャンセル前後で比較したデータの例を示す。

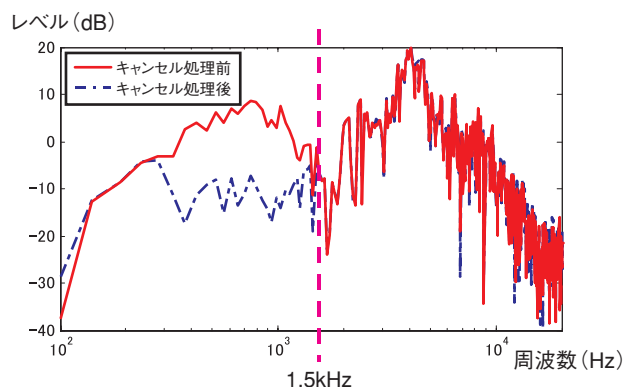


図7 反射音の周波数特性
Fig.7 Frequency Response of Reflected Sound

3.3 空間情報の付加

空間コントロールの仕上げとして、目標とする音響空間の拡がり感を再現するための空間情報付加を行った。

人間は、音源からの直接音とその周囲の物体からの反射音の様子から空間の広さを検知している。この反射音のことを空間情報と呼んでいる。従って、ある部屋の空間情報を正確に再現することができれば、その部屋の中にいる感覚を再現することができると考えられる。

反射音の構造はそのレベルに対し主につぎの二つの切り口で表すことができる。一つは「時間軸」、もう一つは「到来方向」である。まず、時間軸にて目標空間の反射音を再現するために、従来の音場制御のようなリバーブと異なり、サンプリング時間単位で残響の波形を正確に再現することができるフィルタを採用した。しかしながら、時間軸の再現だけでは全方向に渡る拡がり感を得ることができず、反射音の到来方向まできちんと再現する必要がある。

そこで、本システムでは、前方からの反射音をインパネ上の効果音用スピーカ、側方からの反射音をシートスピーカ、上方・後方からの反射音を天井スピーカにそれぞれ受け持たせることにより、実際の空間に非常に近い、時間軸・到来方向の両方を併せた空間情報を再現することが可能となった。図8、9にリスニングルームの反射音到来方向と本システムの反射音到来方向を示す。

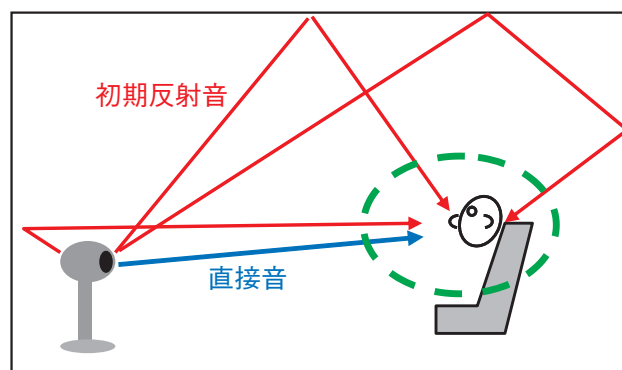


図8 リスニングルームにおける反射音の到来方向
Fig.8 Incoming Direction of Reflected Sound in Listening Room

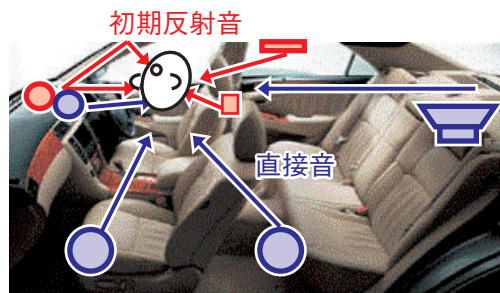


図9 トヨタプレミアムサウンドシステムにおける反射音の到来方向
Fig.9 Incoming Direction of Reflected Sound by Toyota Premium Sound System

4

システム構成

システムの構成について説明する。前章で述べた空間コントロール技術を車室内で実現するため、図10に示すスピーカ配置とした。スピーカを「直接音用」と「音場補正用」に大別し、直接音用のスピーカを従来通りの位置に配置し（図10青字）、音場補正用（空間コントロール用）スピーカ（図10赤字）を追加するという考えでレイアウトを決定した。音場補正用スピーカは不要反射音抑制と空間情報を付加する役目を持つ。本レイアウトの特徴は不要反射音抑制用にシート肩口にスピーカを設置したことと、空間情報の付加用にスピーカをインストルメントパネル、天井、リアトレイに配置したことである（シートスピーカも空間情報の付加に使用する）。天井へのスピーカ設置にあたっては超薄型高音質・高性能スピーカ：TPDS（Ten Planar Dynamic Speaker）を新規開発した。音場補正用スピーカを配置することにより、前後、上下、左右から包み込まれるような空間情報の提供が可能となる。

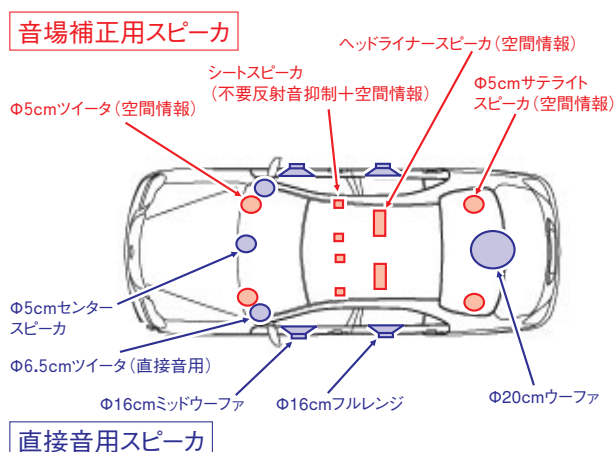


図10 スピーカレイアウト
Fig.10 Speaker Layout

ここで、スピーカの仕様、外観について説明する。

(1) シートスピーカー (φ4cm BOXタイプ)

図11に外観を示す。前席の各シート肩口に左右1組の構成で搭載され、前述の通り不要反射音除去、空間情報の付加に使用する。乗員の着座位置を配慮した指向性を持たせ、スピーカの音軸方向を最適化した。

ボックスは衝突時に乗員を保護できるようシート内部の構造部品を覆った形状となっている。また、省スペースで低音域の再生帯域を確保するためバスレフ構造を採用している。

(2) 天井スピーカー (TPDS)

図12に外観を示す。前席やや後方の天井に搭載されており、空間情報付加用として使用する。

広帯域で低歪率で高品位な音を再生するスピーカを全高8.5mm、質量61gのサイズで開発できたことにより、スピーカ搭載での制約が最小限に抑えられ、理想のスピーカレイアウトが可能となった。

(3) インパネサイドスピーカー (φ5cm+φ6.5cm)

図13に外観を示す。φ5cmを空間情報付加用、φ6.5cmを直接音再生用として2個1組をインパネの両サイドに配置する。スピーカユニットをブラケット／ベゼルにて挟み込むフローティング構造を採用し、スピーカの振動が車両に伝達されるのを抑えることで原音に忠実な音の再生を実現した。マイクロファイバーコーン振動板に加え、よりクリアな音を再生するために振動板（キャップ）素材にチタンを採用した。

(4) インパネセンタースピーカ (φ5cm)

図14に外観を示す。インパネサイドスピーカーと同様、よりクリアな音を再生するために振動板（キャップ）素材にチタンを採用した。

(5) フロントドアスピーカ (φ16cm)

図15、16に外観を示す。磁気回路部に550gのグラントアンカ（錘）を追加することにより、振動板の振幅で発生する反作用の力を受け止め、音の立ち上がりを向上させた。

(6) リアドアスピーカ (φ16cm)

図17、18に外観を示す。過渡特性の向上によってよりクリアな音質を得るために、磁気回路にはネオジウムマグネットを使用した外磁構造を採用した。

(7) リアトレイサテライトスピーカ (φ5cm)

図19に外観を示す。リアトレイの両サイドに空間情報付加用として使用。よりクリアな音を再生するために振動板（キャップ）素材にチタンを採用した。

(8) リアトレイウーファ (φ20cm)

図20に外観を示す。パルプ振動板を使用し、リアトレイの中央から70Hz以下の歯切れのよい重低域を再生する。



図11 シートスピーカー
Fig.11 Seat Speaker



図12 天井スピーカー
Fig.12 Ceiling Speaker



図13 インパネサイドスピーカー
Fig.13 Side Speaker in Instrument Panel

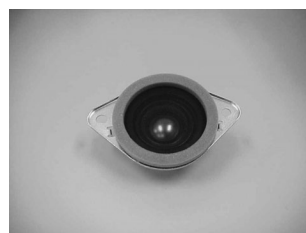


図14 インパネセンタースピーカ
Fig.14 Center Speaker in Instrument Panel



図15 フロントドアスピーカ
Fig.15 Front Door Speaker



図16 フロントドアスピーカ
Fig.16 Front Door Speaker



図17 リアドアスピーカ
Fig.17 Rear Door Speaker



図18 リアドアスピーカ
Fig.18 Rear Door Speaker



図19 リアトレイサテライトスピーカ
Fig.19 Satellite Speaker in Rear Tray



図20 リアトレイウーファ
Fig.20 Woofer in Rear Tray

これらスピーカの効果を最大限に発揮するため、19チャンネル出力の高音質パワーアンプを開発した。全てのスピーカを専用チャンネルで駆動することができ、スピーカの特性に合ったきめ細かなチューニングが可能となった(図21)。リアトレイウーファはハイパワー化をねらってデュアルボイスコイルにしているため、2チャンネル分のアンプで駆動している。

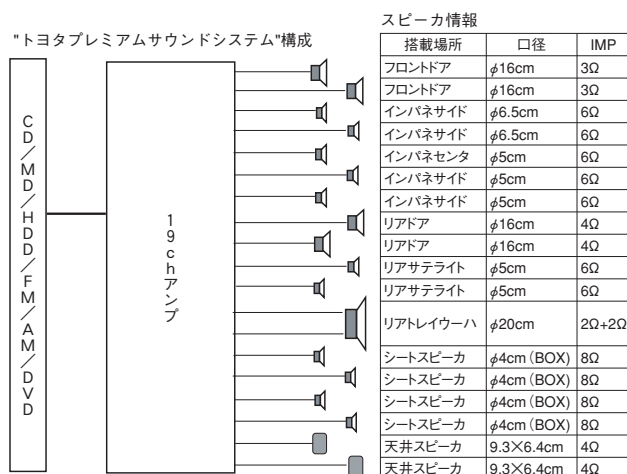


図21 システム構成
Fig.21 System Configuration

ここで、空間コントロールを行なう信号処理部・電力増幅部から構成されるパワーアンプについて説明する。

4.1 ねらいと概要

- (1) 入力～増幅段直前までをALLデジタル化することでノイズ成分を排除し音質劣化を最小限にする。
- (2) オーディオ専用高性能DSPを24bitから32bitにすることで、大量のデータ処理が必要な空間制御の処理能力を確保する。
- (3) 高出力デジタルアンプを採用することで、従来の車両電圧では50Wしか得られなかった出力を、並列接続することで90Wの大出力を得ることが可能。

これらの音質向上策により、外形寸法の増大をおさえながら今までにない高度な音響空間処理とハイパワー化を実現したパワーアンプを開発した。

4.2 要求仕様

今回のパワーアンプの仕様はつぎの通りである。

- ・出力チャンネル数：19ch
- ・総合最大出力：880W
アナログアンプ部 40W×15ch
デジタルアンプ部 50W×2ch、90W×2ch
- ・出力対歪率：0.1%以下（定格出力時）
- ・残留雑音：0.3mVrms以下
- ・外形寸法：346 (W) ×51 (H) ×128 (D) mm
- ・質量：2,400g

4.3 高音質化への取り組み

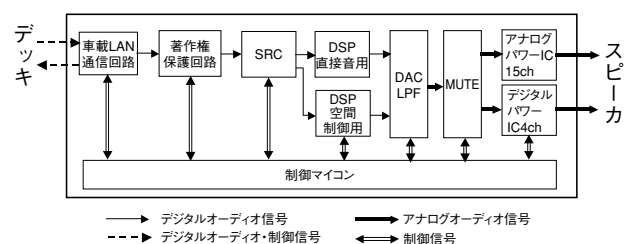


図22 パワーアンプ ブロック図
Fig.22 Block Diagram of Power Amplifier

1) 新DSPの採用

従来機種に搭載しているDSPでは処理量が不足しているため、空間コントロール機能を実現することができない。そこで、今回は32bitという大容量かつ浮動小数点对応の高性能DSPを新規で採用した。これにより、固定小数点型DSPに比べデジタル信号処理を行う際に生じる誤差演算を小さくすることができ音質向上につながる。今回つぎの点を課題としてあげ、本ICの採用に至った。

(1) DSPによる基板実装面積を必要最小限にすること。

狭ピッチBGAパッケージを採用することで実装面積を従来使用してきたDSPよりも小さくできた。

(2) 小型化の実現と伝送による音質劣化を最小限にするため、周辺デバイスの機能を併せ持つICであること。

DSP前段にあるデバイスとの信号の送受信でサンプリングレートコンバータ（以下、SRCという）を使うが、特に本アンプでは音楽ソース系のメイン音声6chとナビ音声やBEEPなどの割り込み系音声6chが入力される仕様のため、12ch分ものSRC ICが必要となる。これらのSRC ICを実装すると基板が大きくなり、制約された基板面積での実装が困難になることから、DSP内にSRC機能を持つものを選択した。

また、SRC機能をDSP内部に取り込むことで、DSP-SRC間の伝送時のノイズによる波形のゆらぎ（ジッタ）が最小限に抑えられるため、個々で外付け部品として実装されたものと比較して音質の劣化が少ない。

2) デジタルアンプの採用と基板の専用化

つぎにパワー出力回路についての取り組みを説明する。

(1) 高出力デジタルアンプの採用

今回、19chのうち4chの低音域：ドアウーファ（50W×2ch）・トレイウーファ（90W×2ch）に対し高出力デジタルアンプを採用した。デジタルアンプの特徴をつぎに示す。

- ① 車両バッテリー電圧（昇圧なし）でも出力段を並列接続してドライブすることができ、低負荷時の駆動力が増して高出力を得ることができる。
- ② 出力段をデジタル化することにより効率が改善され、ロス電力が低減できる。
- ③ 従来のアナログアンプで問題になっていた高出力時の発熱が減少するため、放熱板の面積も低減でき、軽量化・筐体の小型化につながる。

(2) デジタル／アナログ専用独立基板化

デジタルアンプはPWMスイッチング方式を採用しているため高周波帯域のノイズが発生し、グラウンド・電源を介してアナログアンプの出力回路に影響が及ぶことが懸念される。今回高音質化に対し、従来アナログ・デジタルアンプで一体化していた基板を分離してデジタルアンプ専用の基板を設定すると共に、各アンプへの電源回路もそれぞれ専用を設定した。これにより、電源・グラウンドからのノイズの伝導等の懸念がなくなった。また電源回路の専用化で、急激な音量変化における電流供給能力も増し音質向上に寄与できた。

3) 部品による高音質化への対応

- (1) コンデンサ：電源のデカップリングコンデンサに大容量11000 μ F音響用を採用。音質評価をくり返し、本機専用に音質の作り込みを行なった。
- (2) 基板：従来は4層であったデジタル処理部基板を6層化。GND層を専用にすることで、デジタルノイズを音声信号から徹底的に分離・遮断した。

5 空間コントロール技術の効果

本章では3章で述べた車室内における空間コントロール技術の効果について説明する。図23は目標とするリビングルームのインパルス応答と反射音到来方向である。図24、25に空間コントロール処理（反射音抑制＋空間情報付加）OFF / ONの車室内におけるインパルス応答と反射音到来方向を示す。インパルス応答、反射音到来方向共に、OFF時と比べて格段にリビングルームに近づいていることがわかる。

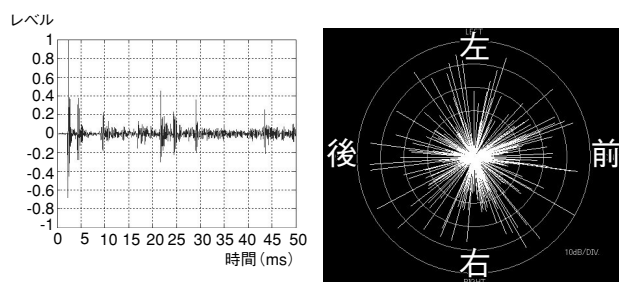


図23 リビングルームのインパルス応答と反射音到来方向（目標）
Fig.23 Impulse Response and Incoming Direction of Reflected Sound in Living Room (Target)

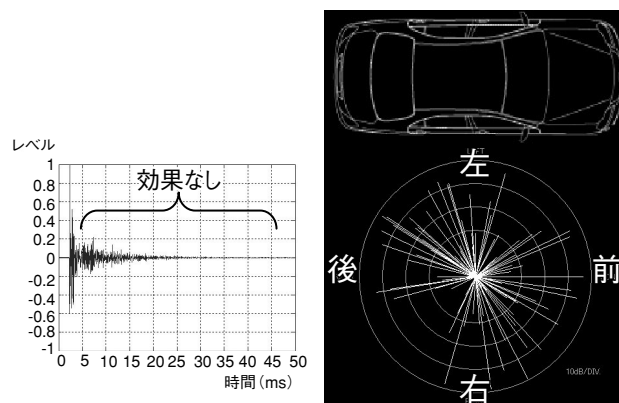


図24 車室内のインパルス応答と反射音到来方向（空間コントロール処理OFF）
Fig.24 Impulse Response and Incoming Direction of Reflected Sound in Vehicle Cabin (Spatial Control OFF)

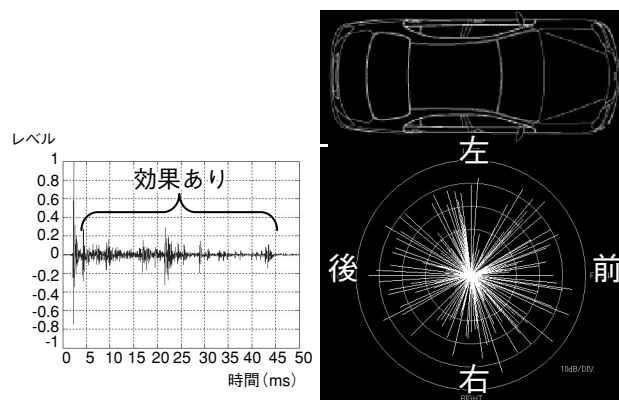


図25 車室内のインパルス応答と反射音到来方向（空間コントロール処理ON）
Fig.25 Impulse Response and Incoming Direction of Reflected Sound in a Vehicle Cabin (Spatial Control ON)

6

まとめ

以上、2008年の新型クラウンに搭載された“トヨタプレミアムサウンドシステム”の音作りについて、開発の経緯とシステムの内容の紹介を交えながら述べた。

図26に当社社員による一般的なプレミアムシステム（10スピーカシステム）との音質比較をレーダチャートで示す。空間コントロール技術によって拡がり感（「前方奥行き感」「後方つまれ感」）を大幅に向上させることに成

功するとともに、スピーカ・アンプの各音質向上技術の結果、ピュア音質にあたる「質感」「迫力感」「レンジ感（低域・中域・高域）」も一般プレミアムシステムに比べて上回った。このことから、ピュア音質と拡がり感の両立が実現できたと考える。

■ トヨタプレミアムサウンドシステム：総合9.2
 - ◆ - 一般的なプレミアムシステム：総合8.5

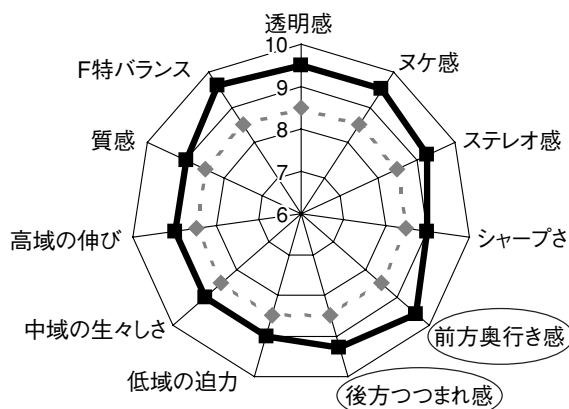


図26 音質比較レーダチャート
 Fig.26 Radar Chart of Comparison on Sound Quality

発売前のターゲットユーザを対象としたパネラ評価会では、多くの方から「拡がり感がある」と高い評価をいただき、ディーラ向け研修会においても「車の中とは思えない」「凄い」と大変好評を得た。またトヨタ自動車殿からはプロジェクト表彰「技術開発賞」をいただいた。

本“トヨタプレミアムサウンドシステム”で培ってきたノウハウを今後の他車の音作りへ伝承すると共に、さらに磨きをかけて「空間コントロール技術」の普及に励みたい。

謝辞

今回の開発に多大のご協力をいただいた、トヨタ自動車殿にこの場をおかりして深く感謝いたします。

記載した製品名などの固有名詞は、各社の商標または登録商標です。

社外執筆者紹介



高橋 寿夫
 (たかはし ひさお)

1986年トヨタ自動車㈱入社。以来、W/H設計、スイッチ設計等に従事。2000年よりマルチメディア系の設計に従事し、現在車両電子設計部第3車両電子設計室に在籍。

筆者紹介



田林 準史
 (たばやし じゅんじ)

2005年入社。以来、車載オーディオシステムの企画／提案～量産設計に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響技術部に在籍。



今村 忠
 (いまむら ただし)

1992年入社。以来、車載オーディオパワーアンプの開発に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響技術部に在籍。



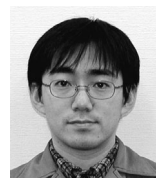
中石 信一
 (なかいし しんいち)

1989年入社。以来、車載マルチメディア機器のソフトウェア開発を経て、現在、デジタル音響機器の開発に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響開発部に在籍。



蔭山 雅義
 (かげやま まさよし)

1986年入社。以来、車載オーディオシステムの企画／提案～量産設計に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響技術部に在籍。



富田 裕二
 (とみた ゆうじ)

1993年入社。以来、車載用音響システム開発に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響開発部に在籍。



山崎 慎一
 (やまさき しんいち)

1988年入社。以来、車載オーディオシステムの企画／提案～量産設計に従事。現在、CI本部 音響事業部 音響技術部 部長に在籍。