

新プレミアムサウンドシステム開発

Development of New Premium Sound System

田林 準史
Junji TABAYASHI

若林 功
Isao WAKABAYASHI

市来 真一郎
Shinichiro ICHIKI

入江 邦彦
Kunihiko IRIE

松島 広典
Hironori MATSUSHIMA

山本 智則
Tomonori YAMAMOTO

要旨

車載プレミアムサウンドシステムの音は各メーカーでさまざまな方向性で開発されているなか、当社はコンテンツの芸術性をユーザに届けることにこだわり、時間軸上での音の波形をいかに正確に再生するかを追求している。車内では耳元でのガラスの反射音やドアパネル、ボディの振動音など、通常のホームオーディオでは発生しない音の波形の乱れが多いという課題がある。高音質化のためにはこれらの音の乱れを補正する必要があると考えた。過去にはシートの肩口にスピーカを追加し反射音を打ち消す音を再生する手法を採用したこともあったが、近年車市場は電気自動車やハイブリッド車が増加し、燃費向上のニーズが高まるなかで車両重量を上げる事は難しく、デジタル信号処理を用いて音の波形を整える技術を開発した。

この技術を中心とした車載プレミアムサウンドシステムの音質向上の取組みについて述べる。

Abstract

The sound of in-vehicle premium sound system is developed with various directional concepts by each manufacture. We, DENSO TEN focus on the delivery of artistic quality of contents to user, and our target is how we accurately reproduce the sound waveform on time axis. In a cabin, there is a problem with many disturbances of the sound waveform that is not generated in normal home audio, such as reflected sound from glass near ears and vibration sound from door panel and body of vehicle. We thought that these disturbances of the sound should be corrected to achieve high quality sound. We have adopted the method that reproduced the sound to cancel the reflected sound by adding the speaker on the shoulder part of the seat in the past. But recently, electric vehicles and hybrid vehicles have increased in automobile market and the need for improving the fuel efficiency increases. Then, we have developed the technology shaping sound waveform by digital signal processing because it is difficult to increase the weight of vehicle.

In this paper, we introduce the efforts of improvement of the sound quality of in-vehicle premium sound system centering on this technology.

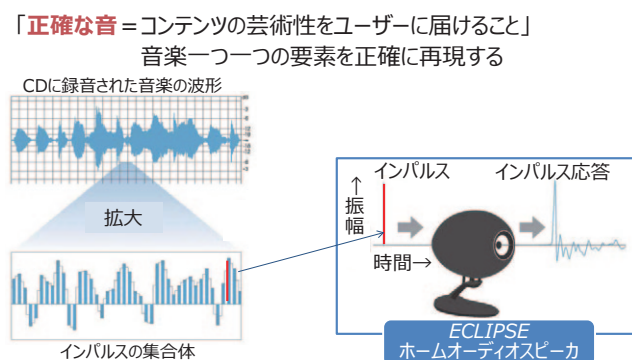
1. はじめに

当社は2018年6月、トヨタ自動車様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。このシステムは車室内で音楽を再生したときに生じる音の波形の乱れを補正することで、当社の目指す「正確な音」を実現している。この稿ではシステムの開発コンセプトと実現するために用いた各種技術について述べる。

2. 開発の目的

2.1 開発コンセプト

当社が目指す音は「正確な音」である。アーティストの想いをそのままユーザに届けるには、音の立上り・立下りなど時間領域での正確な音の再現が重要だと考え追求している。CDに記録されたデジタル信号の波形は拡大するとインパルスの集合体と見なすことができ、インパルスは音楽信号の最小単位と捉えることができる。このインパルスを正確に再生できれば音楽の波形を正確に再現できるという考えのもと、インパルス応答に着目した評価で開発を行っている（図1）。



インパルス=音の最小単位

図1 インパルス応答の再現の考え方

当社ECLIPSEホームオーディオスピーカも2001年の発売以来、一貫して「正確な音」の再生を追求している。これにより、ボーカルの口の動きや演奏者の指使いが見えるような「明瞭感」、キレの

良い演奏のリズムを刻む「スピード感」、録音された音の位置情報まで描く「空間再現力」といった特徴を持つ「正確な音」の再生を実現することができ、世界トップクラスのミュージシャンやレコーディングエンジニアから高評価を受けている（図2）。



図2 ECLIPSE ホームオーディオスピーカ外観

クラウン向け“トヨタプレミアムサウンドシステム”ではこのECLIPSEホームオーディオスピーカの正確な音を車室内で実現することを目標として音作りを行った。

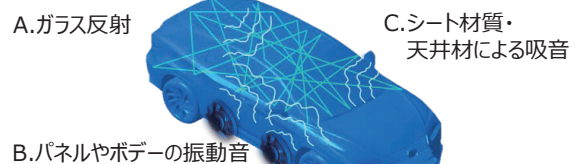
2.2 車室内の音作りの問題点と対策

ただし車室内はホームオーディオの試聴環境とは異なるため、主に二つの問題が生じる。

問題①：インパルス応答が大きく乱れる

車室内ではガラスからの強い反射音やドアパネル、ボディの振動音が混ざり、インパルス応答が大きく乱れる（図3）。

●車室内は、音響空間として厳しい環境



●車室内のインパルス応答

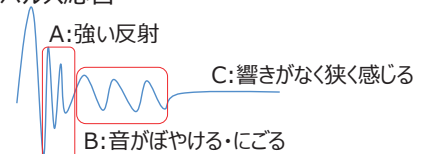


図3 車室内のインパルス応答の乱れ

車室内で正確な音を再生するためにはこのインパルス応答の乱れを補正する必要がある（図4）。

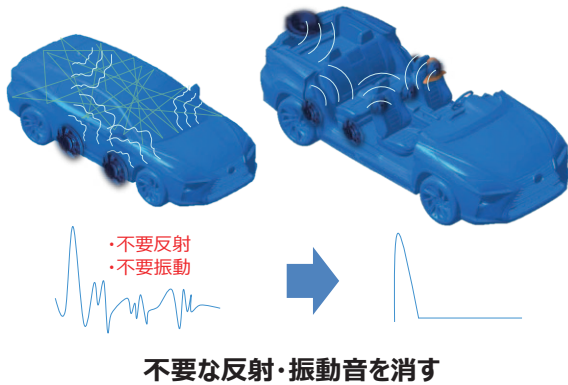


図4 インパルス応答の乱れを補正

以前は耳元に近いシートの肩口にスピーカを追加し、逆位相の音を再生してインパルス応答の乱れを補正する手法を採用していた。しかし、スピーカ数・重量が増加するなどの背反があった。このため今回はスピーカを追加することなく、デジタル信号処理を用いてインパルス応答を整える手法を取った。これを「インパルス応答整流技術」と名付けた。この内容について3章で述べる。

問題②：耳に近い方のスピーカに音が偏る（図5）。



図5 定位の偏り（イメージ）

カーオーディオ特有の問題は、本来目の前から聴こえてくるはずの音⁽¹⁾が左右近い方のスピーカ側に偏って聴こえてしまう「定位の偏り」である。これを解決するために独自の定位補正技術を使っている。これを4章で述べる。

*⁽¹⁾ 音楽に含まれるモノラル成分。ボーカルやバスドラムなどに多い。

このサウンドシステムはパワーアンプの回路やスピーカ単体性能についてもこだわり、システムトータルで「正確な音」を実現している。5章でその内容について紹介する。

3. インパルス応答整流技術

3.1 インパルス応答整流技術の紹介

この技術は車室内環境で乱れたインパルス応答を聴取位置で整え、音の明瞭感、スピード感、空間再現力を向上させる技術である。

アンプ内のDSP（Digital Signal Processor）で音源に対し事前に補正フィルタの処理を行い、聴取位置でインパルス応答波形の再現を実現する。補正フィルタの設計は、入力からスピーカを含む耳元までのインパルス応答を測定し、ECLIPSE ホームオーディオスピーカの開発で培った独自の評価技術を活用して“インパルス応答の乱れ”を抽出し補正を行う（図6）。

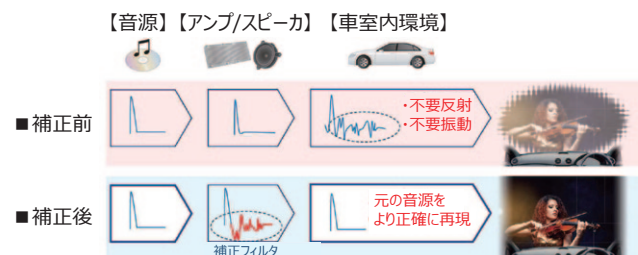


図6 インパルス応答整流技術イメージ

3.2 課題と方策

この技術の車載への適用課題として、次の二つがある。

一つ目の課題は「聴取位置による音質差」である。異なる試聴時の耳位置や乗員の座席位置によってインパルス応答整流の効果が変動することである。これは補正フィルタの効果が得られるエリアが狭い範囲に限られており、聴取位置の変動による影響を受けやすい制御となっていたためである。

対応策としてまず車室内を複数のエリアに分割して、エリアごとに多点でインパルス応答を測定する。各データから過去に積み上げてきた経験や知見を元に共通する特徴点を抽出して補正特性を決定する。これにより聴取位置による音質差を低減し、聴取エリアの拡大を図った（図7）。

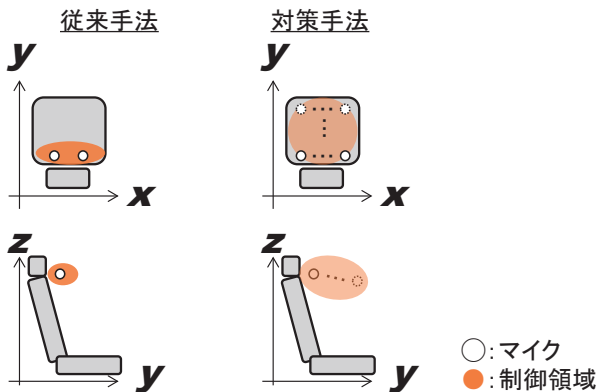


図7 聴取位置による音質差への対応策

もう一つは、「多数スピーカシステム対応」である。プレミアムシステムでは、再生帯域の拡大や拡がり感の向上を狙って多数個のスピーカを使っている。このようなシステムにおいて、どうやってインパルス応答整流を実現するのが課題だった。

従来は、再生帯域を分割して、ウーファ、スコーク、ツイータとそれぞれが得意とする帯域を再生するスピーカを用いて分担する周波数特性に着目した音づくりをやっていた。インパルス応答整流では、それぞれのスピーカごとに独自に処理しようとするとうとうどうしても帯域的に無理が生じてしまうため、考え方として高域を担うスピーカと低域を担うスピーカを仮想的に一つのスピーカとして扱える独自の結合フィルタを構成し、各仮想スピーカに対してインパルス応答整流を行った（図8）。

これにより、それぞれのスピーカの特性を活かしながら最適なインパルス応答整流を行っている。さらに、この仮想スピーカの考え方によりチューニングすべきスピーカ数が減少し、音響設計を効率的に行えるようになった。

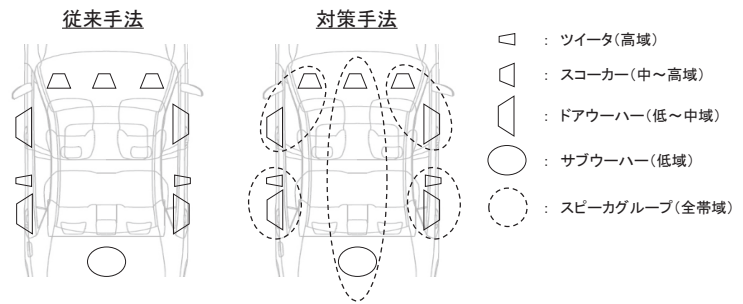


図8 結合フィルタの例

最後にインパルス応答整流技術補正前後のインパルス応答波形の測定結果を示す（図9）。補正前に乱れていたインパルス応答波形の立上り部分が、補正後にはピークがしっかり出て整っていることが確認できる。

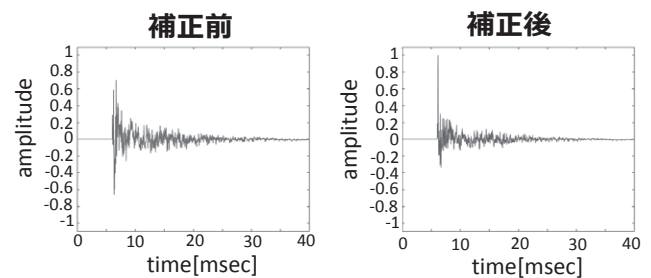


図9 補正前後のインパルス応答波形

4. 定位補正技術

4.1 定位の偏りが起こる要因

車室内では、聴取位置に対してステレオ再生のスピーカが左右非対称の関係になっているため、サウンドステージの偏りを生じ、特に中央に定位すべき音像が近い方のスピーカに片寄ってしまう。これは、近い方のスピーカの音が聴取者の耳に早く届いてしまうことで生じるため、遅延処理をすることで改善できる。しかし、この方法では左右それぞれ反対側の席では逆効果になってしまう。

4.2 従来の定位補正技術における課題

そこで従来技術では、中央の音像定位を左右同

時に改善するため、両耳間の位相周波数特性に着目し、オールパスフィルタ⁽²⁾を使って、定位感に寄与する帯域の位相を合わせ処理が考えられる。ところが、オールパスフィルタを使った処理ではインパルス応答で見た場合、応答波形を乱す。したがって、中央の音像定位感の改善と音のクリアさがトレードオフの関係になってしまう。

4.3 新たな定位補正技術の開発

そこで今回のシステムではセンタースピーカを積極的に活用し、各スピーカから聴取位置に届く音のレベルとタイミングを空間上で上手く合成し調整することで中央の音像定位感の改善を行う新たな定位補正技術を開発した。

定位感の評価は、IACC (Inter Aural Cross-Correlation: 両耳相関係数) を用いている。IACC は両耳間に加わる信号波形の相関を測定したものであるが、当社ではこれを車室内で特に乱れの大きく聴感上問題になる 100Hz から 1kHz にかけて周波数ごとに測定してグラフ化し、評価している (図 10)。

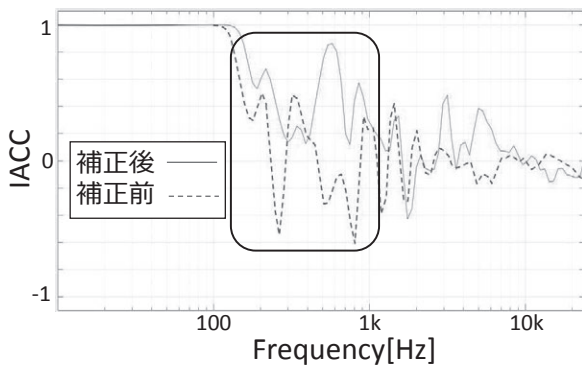
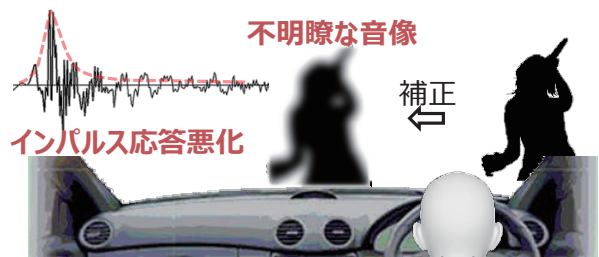


図 10 補正前後の IACC グラフ

この定位補正技術によってインパルス整流技術で得られたクリアな音像を損なうことなく明瞭な定位感を得ている。従来の定位補正技術と新たな定位補正技術の結果を示す (図 11)。

*⁽²⁾ オールパスフィルタ：振幅特性はそのまま、位相特性だけを変化させるフィルタ回路

従来の定位補正技術



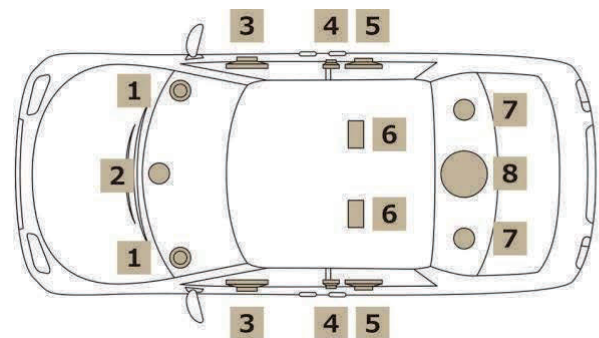
新たな定位補正技術



図 11 従来と新たな定位補正技術による結果 (インパルス応答と音質イメージ)

5. システム構成

システム構成について説明する。フロント席、リア席両方のリスナーを考慮したスピーカ配置とした (図 12)。



- 1 9cm/2.5cm フロントサイドスピーカ ×2
- 2 9cm センタースピーカ
- 3 18cm フロントドアウーファ ×2
- 4 2.5cm リアドアツイータ ×2
- 5 16cm リアドアスピーカ ×2
- 6 薄型天井スピーカ ×2
- 7 9cm リアサテライトスピーカ ×2
- 8 20cm リアトレイサブウーファ

図 12 スピーカ配置

ここで各スピーカの技術について説明する。

5.1 スピーカ技術

スピーカ単体においても、「正確な音」を目指しインパルス応答の再現を高める技術を投入している。

(1) 1 9cm / 2.5cm フロントサイドスピーカ (図 13)

中域を再生する 9cm と高域を再生する 2.5cm を同軸上に配置するコアキシャル型を採用し、波形の乱れの少ない明瞭な音を実現した。

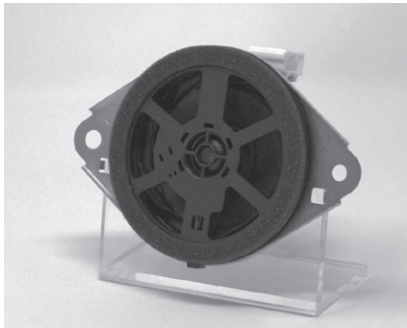


図 13 フロントサイドスピーカ

・9cmスピーカ部

振動板に二層振動板を採用し、音の立上りが速く、余分な付帯音のない音質を実現した。

振動板の物性値は伝播速度が速く (= 剛性が高く)、損失が高い (固有共振の少ない) ものが理想とされているが、相反する特性のため、単一材料では実現困難であった。その課題に対し、物性値の異なる二つの材料を二層に配置することで両立を実現した。

・2.5cmツイータ部

ツイータ部にはソフトドーム振動板を採用し、固有音の少ない自然な音質を目指した。

(2) 2 9cm センタースピーカ

7 9cm リアサテライトスピーカ (図 14)

振動板に二層振動板を採用し、音の立上りが速く、余分な付帯音のない音質を実現した。

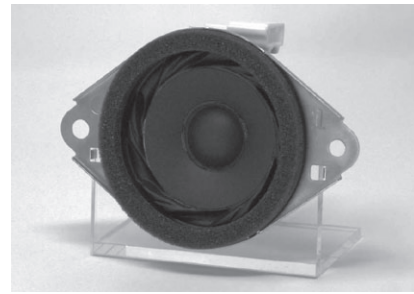


図 14 センタースピーカ・リアサテライトスピーカ

(3) 3 18cm フロントドアウーファ (図 15)

5 16cm リアドアスピーカ (図 16)

HR (HYPERBOLIC PARABOLOIDAL ROTATION) 形状の二層振動板を採用し、HR 形状にすることにより、ウーファに求められる高剛性を確保した。さらに共振分散効果により、固有音のない自然な音色を実現した。



図 15 フロントドアウーファ



図 16 リアドアスピーカ

(4) 4 2.5cm リアドアツイータ (図 17)

ソフトドーム振動板を採用し、固有音の少ない自然な音質を目指した。



図 17 リアドアツイータ

(5) 6 薄型天井スピーカ (図 18)

前席や後方の天井に搭載されており、空間情報付加用として採用し、音像が上がり、より広い空間再現を実現した。



図 18 薄型天井スピーカ

(6) 8 20cm リアトレイサブウーファ (図 19)

HR 形状ノンプレス振動板を採用し、HR 形状に加え、材厚を上げることでさらに剛性を確保した。大入力時にもひずみのない低音再生を実現した。



図 19 リアトレイサブウーファ

これらスピーカの性能を余すことなく発揮できるよう 12 チャンネル出力の高音質パワーアンプを

開発した。16 個のスピーカを 12 チャンネルで再生し、スピーカの特性に応じた緻密なチューニングを可能としている (図 20)。

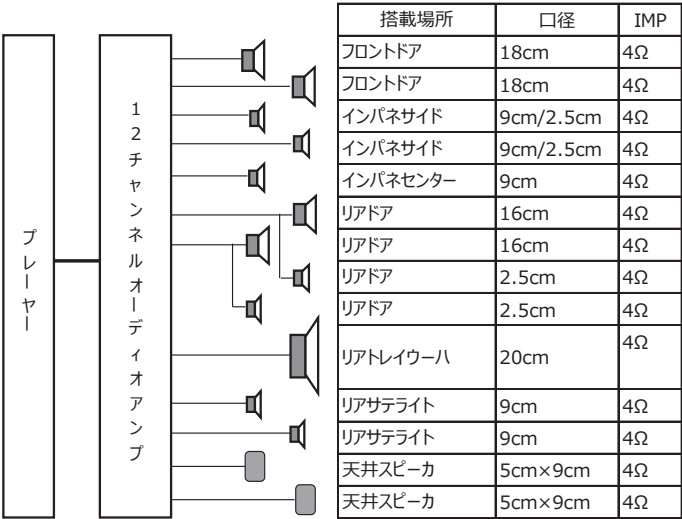


図 20 システム構成

5.2 アンプ技術

パワーアンプの技術について説明する。

5.2.1 時間軸領域に対する音作り

アンプでインパルス応答性能を良くしようとする場合、これまでは次の内容を重要視してきた。

- ・位相／群遅延特性が平坦であること
- ・ダイナミックレンジが大きいこと

この内容に加えて、インパルス応答性能だけで表現することが困難な、波形のひずみ成分やノイズ成分を取り除くことにこだわった。

ひずみ／ノイズ成分は、アンプ内部の電子回路の動作に起因する成分によるものが多い。これはインパルス応答波形に非常に小さいレベルで含まれている。このノイズの有無により実際に音質を比較評価するとノイズがない場合の方が圧倒的に原音忠実に近いという結果を得ている (図 21)。

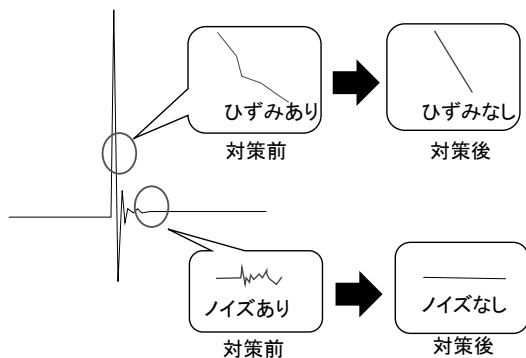


図 21 インパルス応答波形に含まれるノイズ

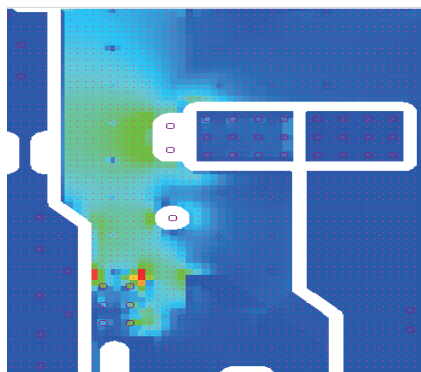
ひずみ／ノイズを取り除く作業は、非常に膨大な時間を費やすことになるが、取り除いた際のインパルス応答性能の波形品質の良さと音質の良さを重要視し、取組んだ。

5.2.2 シミュレーション活用による効率化

今回、ひずみ／ノイズ成分を取り除く作業を効率よく行うべく、基板シミュレーションを導入した。

このシミュレーションは

- ・ひずみ／ノイズ電流の経路、影響範囲の算出
- ・ひずみ／ノイズ低減に必要な基板回路特性の算出に活用している（図 22）。

図 22 基板シミュレーション結果の例
(ひずみ／ノイズ電流の経路、影響範囲の算出)

実際の聴感評価を行う前に、さまざまなパターンで対策した場合のシミュレーションを多く行っている（図 23 中①）。その中で効果的なアイテムに対して聴感評価で確認を行う流れとした（図 23 中②）。

また、その結果をシミュレーションに反映させることで効果／対策予測の精度を積み重ね、効率よく検討を進めることができた（図 23 中③）。

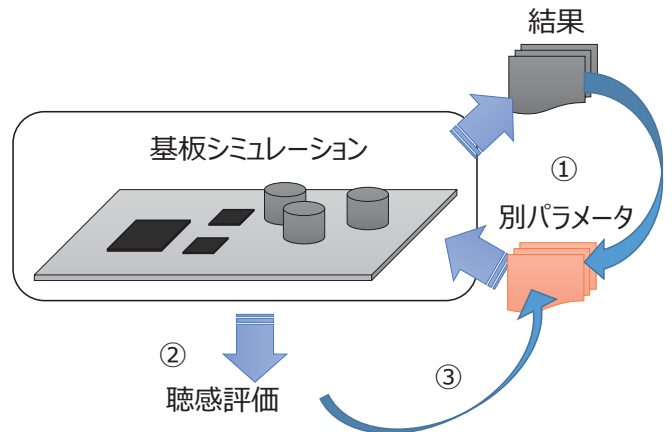


図 23 シミュレーションと実機検証の流れ

効果として今回開発したオーディオアンプの音質は、ハイハットなどの細かいリズム、音色などの微細な音の変化の部分が非常に良く再現した音に仕上がっている。是非その音を体感して頂きたい。

今回開発した製品（オーディオパワーアンプ）の外観を図 24 に示す。

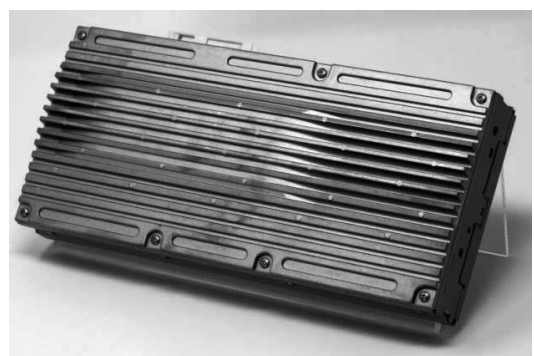


図 24 今回開発したオーディオパワーアンプ

6. まとめ

以上、2018 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、開発の経緯と技術の紹介を交えながら述べた。

一般的なプレミアムシステムとの音質比較結果

をレーダーチャートで示す（図 25）。インパルス応答整流技術と新定位補正技術によって、「明瞭感」、「スピード感」、「空間再現力」、「定位感」が大幅に向上すると共に、アンプ・スピーカの各音質向上技術により、「ひずみ感」、「低域」、「中域」、「高域」の質感も一般のプレミアムシステムを上回った。自信を持ってお届けできる仕上がりになっており、ぜひ聴いて頂きたい。

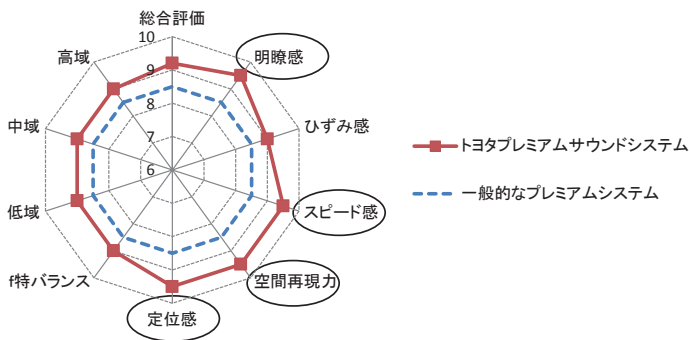


図 25 音質比較レーダーチャート

また、この“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音作りへ伝承すると共に、さらに磨きをかけて「インパルス応答整流技術」をより多くの車種へ展開していきたい。

謝辞

今回の開発に多大なご協力をいただいた、トヨタ自動車様にこの場をお借りして深く感謝いたします。

- ・CROWN（クラウン）は、トヨタ自動車株式会社の登録商標です。
- ・ECLIPSEは、株式会社デンソーテンの登録商標です。

筆者紹介



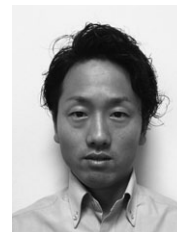
田林 準史
たばやし じゅんじ

CI 技術本部
第四技術部



若林 功
わかばやし いさお

CI 技術本部
PF 企画開発室



市来 真一郎
いちき しんいちろう

株式会社デンソーテン
テクノロジー



入江 邦彦
いりえ くにひこ

CI 技術本部
第四技術部



松島 広典
まつしま ひろのり

フォスター電機株式会社



山本 智則
やまもと とも のり

CI 技術本部
第四技術部