技術ノート

車室内音響特性の技術動向

Acoustic measurement trend in a car compartment

本島 顕 *Akira MOTOJIMA*
若林 正美 *Masami WAKABAYASHI*
大谷 清司 *Kiyoshi OHTANI*

1 はじめに

カーオーディオの音づくりは、AMラジオ全盛期にはスピーカ1個がインパネに取付けられた状態で、聞き疲れしない音であればよいとされた時代であった。その後、コンパクトカセット，CDの登場により、再生周波数帯域やダイナミックレンジの拡大が求められるようになってきた。

スピーカシステムも、再生周波数帯域，ダイナミックレンジの拡大に伴いマルチウエイ化し、現在ではDVD5.1chシステムに対応するために、10個以上のスピーカシステムが搭載されている車も多い（**図1**）[1]。

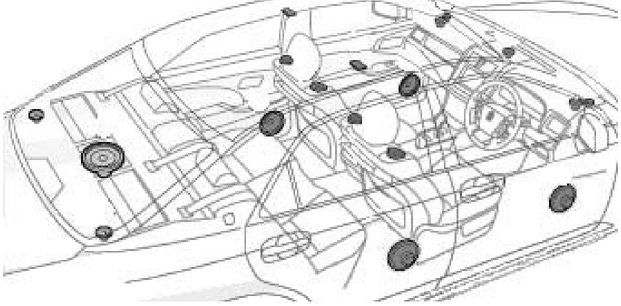

図1　スピーカレイアウト例（トヨタ08クラウン）
Fig.1 Example of speaker layout (TOYOTA 08 CROWN)

これらのオーディオシステムの変遷に対して、その音響特性を評価するための測定器も、日々新しくなってきている。古くは、マイクロホンで収音した信号のレベルを、ペンレコーダでロールペーパに記録していくだけのアナログ測定器が主流であった。その後、デジタル機器の発展により、単体で周波数解析が行えるFFTアナライザが多くの測定に用いられるようになってきた（**図2**）。そして、現代ではパソコンの処理能力が向上したために、パソコンで処理演算を行う、パソコンベースの音響測定器が主流になっている。これにより、音響処理の自由度が向上し、専用測定器の時代とは異なり、各社独自の音響解析・データ表示が簡単に行えるようになっている。

図2　ポータブルFFTアナライザの例（小野測器CF-360）
Fig.2 Example of portable FFT analyzer (CF-360 produced by Ono Sokki)

2 車室内音響測定の特徴

通常のリスニングルームと比較すると、車室内音場はかなり特殊な音場である。車室内の内容積は3 m^{3}程で非常に狭く、シートなどの吸音体が多量に存在するため響きがほとんどない。また、車室内ではガラスなどの反射物がスピーカの近傍に存在するので、直接音に近接した大きな初期反射音が存在する。これらの反射音は響きとは感じられずに、直接音の音色が変化したように感じる。

図3・4に車室内でのインパルス応答例と、試聴室でのインパルス応答例を示す。試聴室での測定例（**図3**）では100 ms以降も反射音が存在するが、車室内測定データ（**図4**）では20 ms以内で反射が収束していることがわかる。

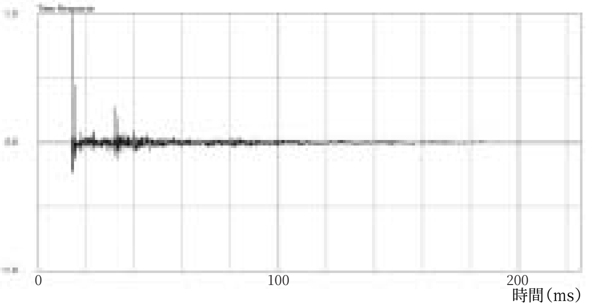

図3　試聴室のインパルス応答例
Fig.3 Example of impulse response in a listening room

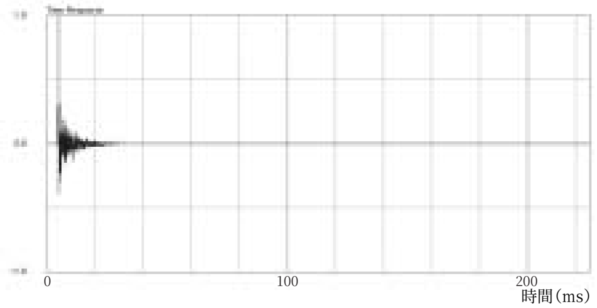

図4　車室内のインパルス応答例
Fig.4 Example of impulse response in a car compartment

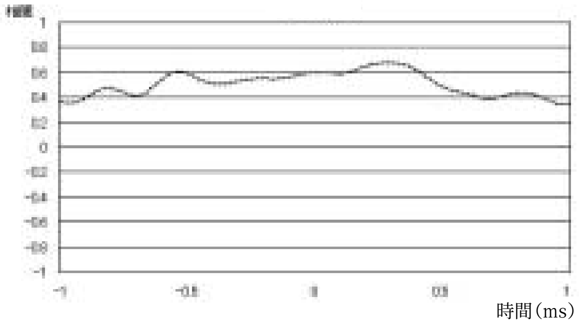

図6　車室内の相関グラフ
Fig.6 Correlation graph in a car compartment

車室内のガラスなどによる大きな反射音は、特定方向から到来するために、音響測定時のマイクロホン位置が少し動くだけで反射音状態は大きく異なる。**図5・6**に、5 cm離れた2本のマイクロホンで測定したインパルス応答から算出した、相関グラフを示す。二つのインパルス応答波形の類似性を、波形を±1 ms動かして計算させた結果である。**図5**は試聴室、**図6**は車室内の測定値で、**図6**は車室内のフロントドアスピーカを再生した時のデータで、**図5**の試聴室データも測定位置関係は車室内に疑似させている。

図5の試聴室データを見ると、相関のピークがはっきりわかり、その値も0.9以上となっている。一方、**図6**の車室内データを見ると明確なピークがわからず、値も0.6程度である。このデータからもわかるが、車室内では試聴室と比較すると、測定位置変化に対して音響特性の変化が大きいことがわかる。つまり、座席の移動，乗員の頭の移動に対して、音響特性が大きく変化することになる。このように、車室内での音響測定では、これらの音の特徴をいかにデータで表現するかが重要になっている。

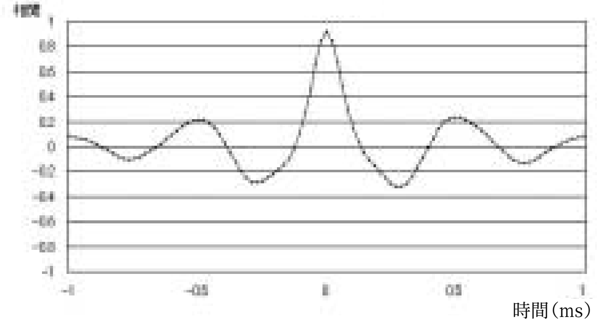

図5　試聴室の相関グラフ
Fig.5 Correlation graph in a listening room

その他、車載用のスピーカは取付け位置の制約から、フロントドアやインパネ両サイドに取付けられることが多いので、スピーカ配置に対して乗員の聴取位置が左右席で非対称になり、ステレオバランスが悪くなることも車室内音場の大きな特徴である。これらの音の定位状態を表現するために、HATS（Head And Torso Simulator）を用いた両耳相関の測定を行うことが多い（**図7**）。

図7　HATS（Head And Torso Simulator）
Fig.7 HATS (Head and Torso Simulator)

3　車室内音響測定法の紹介

本項では、一般的に行っている車室内音響測定法を紹介する。古くから最も一般的な測定として実施されてきたのが、音圧周波数特性の測定である。通常の音圧周波数特性は、正弦波をスピーカより再生して、そのマイクロホン応答を記録するものである。ところが、2項でも説明したが、車室内では直接音に続く初期部に大きな反射音があるので、それらの反射音間で位相干渉が激しい。**図8**に車室内で測定した正弦波による音圧周波数特性を示す。細かなピークディップがあることがわかる。一般的に1/3オクターブバンド以下のピークディップは聴感上判りにくいといわれているので、車室内で音圧周波数特性を測定する場合は、ピンクノイズを再生して1/3オクターブバンド解析

を行うことが多い。**図9**に、**図8**の車を1/3オクターブバンド解析したデータを示す。**図8**に比べると平均されてピークディップが少なく、データが見やすくなっている。

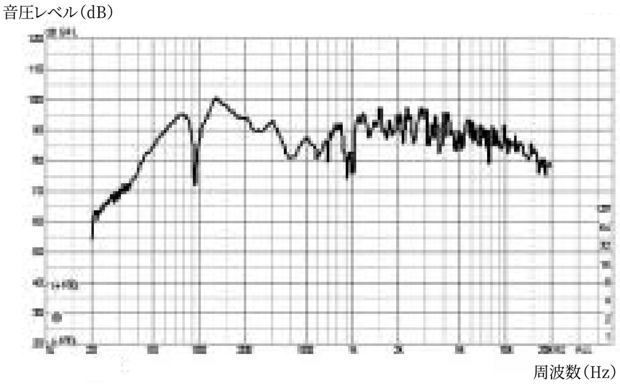

図8　音圧周波数測定（正弦波スイープ）
Fig.8 Measurement of Frequency Response (Sine-wave sweep)

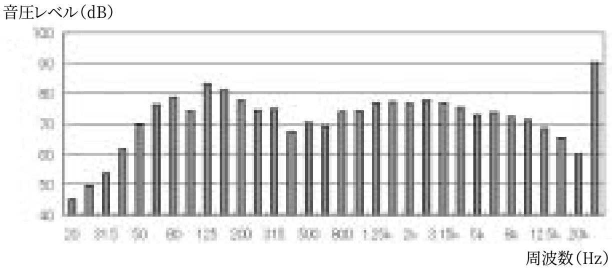

図9　音圧周波数特性（1/3オクターブバンド解析）
Fig.9 Frequency Response (1/3 octave band analysis)

音圧周波数特性の測定は、人が乗車した時の状態を想定してHATSを用いて測定することもある。ただし、HATSでの測定では、頭部や耳介の影響で、音の到来方向によって特性が異なることから、音圧周波数特性の絶対値を評価することは難しい。よって、音圧周波数特性の評価でも、左右耳応答の違いを評価することが多い。**図10**に車のフロントスピーカを再生した時の運転席に設置したHATS両耳の音圧周波数特性差の例を示す。（左耳を基準にした右耳の音圧周波数特性）周波数によって両耳のレベル差が異なっていることがわかる。

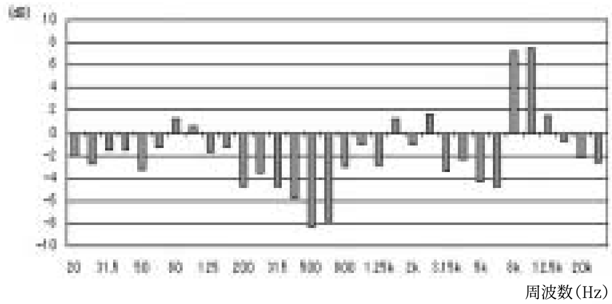

図10　音圧周波数特性差（HATS右耳/左耳）
Fig.10 Difference of Frequency Response (Right ear / left ear of HATS)

一方、パソコンベースの音響測定器が主流になった現代では、インパルス応答を測定して、そのデータからさまざまな解析を行うことが多い。2項でもインパルス応答データ例を示したが、このインパルス応答データから、よく行なわれている解析項目を以下に示す。これらの内、フロントドアスピーカの「立下り累積スペクトラム」を算出表示した例を**図11**に示す。振動している周波数が長く尾を引いていることがわかり、ドアやトリムの振動状態の解析に用いられる。

【インパルス応答からの解析項目例】

- FFT解析による音圧周波数特性の算出
- FFTの解析窓を順にずらして周波数特性を重ね書きする「立下り累積スペクトラム」の算出
- 残響解析（残響時間，C値：Clarity，D値：Definitionなど）
- 明瞭度算出（STI：Speech Transmission Index，RASTI：Rapid STIなど）
- エネルギーレスポンス算出

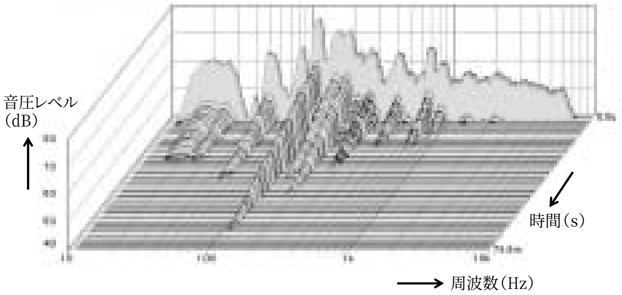

図11　立下り累積スペクトラム
Fig.11 Cumulative spectra

4　当社の取組み

当社のカーオーディオ開発においては、当社独自のオーディオシステムや、車載用として世界初の製品なども開発してきた。これらの製品開発においては、製品開発と合わせて独自に開発してきた音響測定法もあるので、本項では当社独自の取組みに関して紹介する。

4.1 空間情報の測定

1989年に車載用としては世界初となる、音場制御装置（α-5000P）を製品化した。[2] この製品は、反射音を付加して、コンサートホールなどの響きを車室内で再現するシステムである。本製品を開発するにあたって、実際のコンサートホール音場の反射音構造を解析する必要があったので、早稲田大学の協力を得て、近接4点法の測定システムを開発した。[3] 近接4点法は、近接した4本のマイクロホンに入るインパルス応答の時間差から反射音位置（仮想音源）

を計算し、表示する方法である。**図12**に、あるコンサートホールの測定例（指向性拡散図）を示す。各反射音の方向と大きさを、線の方向と長さで示している。音場制御を施した車室内での効果を把握する手法としても、近接4点法を使用している。

その後、近接4点法による空間情報の測定は、パソコン，デジタル機器の能力向上に伴い小型化し、2000年度からWindows対応の解析ソフトの開発を進め、2004年より運用している。

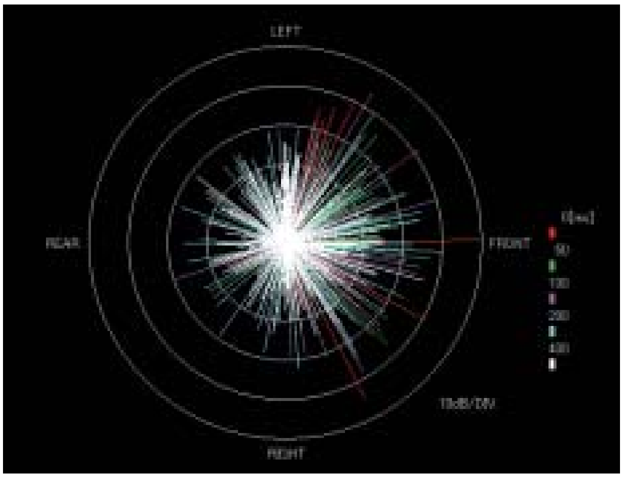

図12　コンサートホールの仮想音源分布図
Fig.12 Distribution figure of virtual sound source in concert hall

車室内音場を、自然な拡がり感のある音場にするために、さらに新しいシステムとして、2008年にトヨタ自動車のクラウンに「空間コントロール」システムを搭載した。[4] これに合わせて、独自の音響測定器を開発した。近接4点法同様、仮想音源を算出する機能は同じであるが、パソコンベースの測定器として、さまざまなデータ解析ができる測定器になっている。4入力，1出力の構成で、4チャンネルのインパルス応答を測定し、パソコンでデータ解析を行う。**図5・6**のチャンネル間の相関グラフもその解析例である。その他、4チャンネル間の周波数特性・反射音状態のバラツキ度合いの解析などを行い、音場の均一性の評価ができるようになっている。**図13**に新しい測定器で解析した試聴室での指向性分布図を示す。試聴室正面にスピーカを設置して測定した結果で、正面がY軸方向にあたる。3次元表示になっており、パソコン画面で、視点を動かして見ることができる。また、同じデータを風向表示した結果を**図14**に示す。図中の丸が仮想音源位置で、大きさを線の長さで表示している。

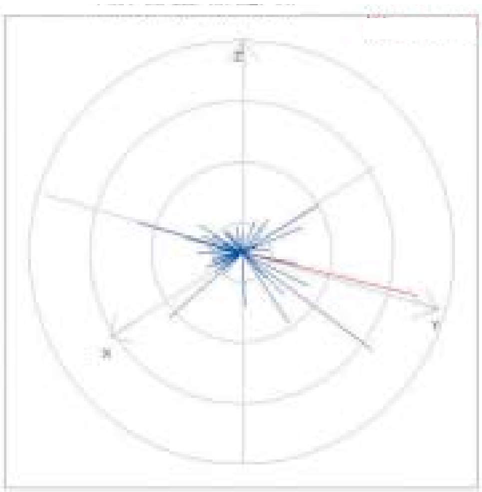

図13　試聴室の指向性拡散図
Fig.13 Figure of directional diffusion in a listening room

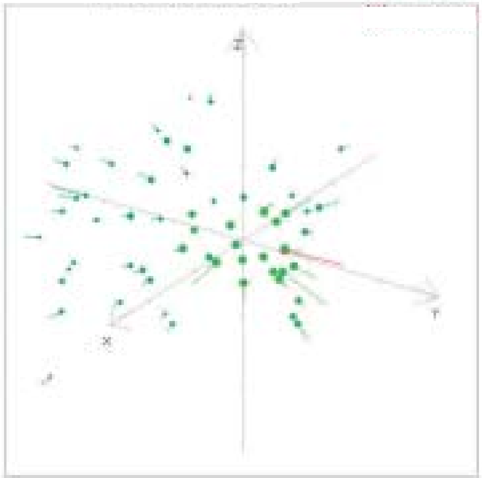

図14　試聴室の指向性拡散図（風向表示）
Fig.14 Figure of directional diffusion in a listening room (Wind direction indication)

4.2 過渡特性の測定

2000年に過渡特性に優れたタイムドメイン方式のスピーカを製品化[5] したが、製品開発にあたっては、過渡特性をさまざまな角度から評価できる独自の解析法を開発した。過渡特性はインパルス応答に全て表現されているが、波形のみを比較してもわかりにくいので、インパルス応答からの二次処理を行ってデータを見やすくしている。

二次処理の例として、**図15**に無響室で測定したスピーカのマルチインパルス応答を示す。その測定法は、スピーカの周囲で約800点程のインパルス応答を、ロボットを用いて測定しパソコンで波形を合成したものである。音の波が拡がっていく様子がわかる。このデータは、動画にもなっており、波面の時間による動きが見られるようになっている。

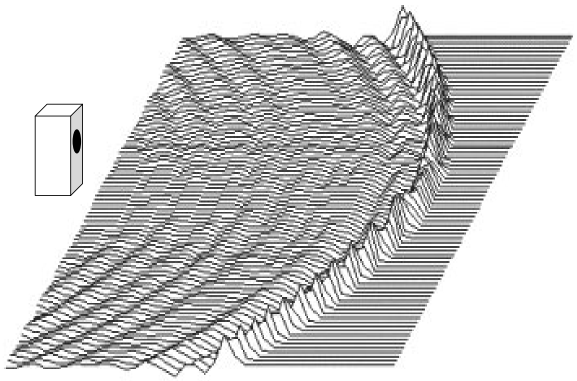

図15　マルチインパルス応答
Fig.15 Multi impulse response

5　おわりに

カーオーディオシステムはライン純正に代表されるように、あらかじめ車の中での音づくりを行って販売されるケースが多い。よって、使用される場面で精度はさまざまであるが、音響測定が重要な評価尺度になっている。本文中で、一般的な測定法、当社独自開発の測定法を紹介してきたが、今後はパソコンを含めたデジタル機器の小型化、低価格化が進むので、各社独自の音響解析が主流になってくると思われる。また、従来は音響測定で得られたデータを見ながら音づくりをしてきたが、今後は音響測定データを基に、オーディオシステムの制御パラメータを自動的に調整していく、自動チューニングシステムが発展してくると思われる。当社も市販システムで、車室内で測定したデータを基にパラメータを自動調整するE-iSERV機能が製品化されているが、設計時間の短縮，音づくりの精度向上を狙いに、今後はさらに細かい制御パラメータを自動調整することが可能な、測定器一体となったシステムの開発を進める予定である。

参考文献
1）トヨタプレミアムサウンドシステム　トヨタ自動車ホームページ　ナビゲーション・オーディオ・ETC
2）渡邊栄治郎他「DASPの応用製品（サウンドプロセッサ)」富士通テン技報13号（1989）
3）長野　武他「車室内音場制御と音場解析」富士通テン技報13号（1989）
4）高橋寿夫他「空間コントロール技術を用いたクラウントヨタプレミアムサウンドシステム」51号（2007）
5）西川　彰他「タイムドメインオーディオシステムの開発」富士通テン技報38号（2002）

筆 者 紹 介

本島　顕
（もとじま　あきら）
1983年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI本部　音響事業部　音響開発部に在籍。

若林　正美
（わかばやし　まさみ）
1999年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI本部　音響事業部　音響開発部に在籍。

大谷　清司
（おおたに　きよし）
1990年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI本部　音響事業部　音響開発部　開発チームリーダ。