

特集：新型MAZDA3

19

新型MAZDA3 サウンドシステムの開発 Development of Sound for All-New Mazda3

六浦 潔*1 若松 功二*2 山中 尋詞*3
Kiyoshi Mutsura Koji Wakamatsu Hiroshi Yamanaka
平尾 幸樹*4 西嶋 孝祥*5 手島 由裕*6
Kouki Hirao Takayoshi Nishijima Yoshihiro Teshima

要 約

新型MAZDA3では、マツダが考える音響性能の理想を定義し、量産性を見据え機能配分しスピーカーユニット、レイアウトを一新した。理想の音響性能を追求するため、CAE技術による車室内の音場特性の可視化を行いスピーカーユニットの最適な配置場所を見出した。容量3リットルのバスレフ型ウーファーのカウルサイド配置と、スクーカーとツイーターのドア上部への配置をベースとするシステムで、新型MAZDA3のサウンドは新世代商品群のリードとなる車種にふさわしい音響性能を実現した。本稿では、その内容について紹介する。

Summary

With a definition of an ideal acoustic performance for Mazda, the speaker unit and its layout are redesigned for the All-New Mazda3 by allocating functions with a consideration on productivity. We visualized the sound field characteristics in the car by CAE technology and found the optimal placement of the speaker units to pursue the ideal acoustic performance. The All-New Mazda3 has achieves the appropriate sound as the leading model of new generation products with the sound system based on the placement of a 3 liters bass reflex type woofer in the cowl side and the placement of squawker and tweeter on the top of the door. This paper introduces the main features of the All-New Mazda3's sound system and its technology.

Key words : Information, Communication, and Control, Audio, Sound System, Acoustic Performance, Speaker Layout

1. はじめに

新世代商品群のサウンドシステム開発では、多くのお客様があらゆる走行シーンで良い音と感じられる音響空間を造ることを目指した。そのために、車室内の理想音響を新たに定め、音場をコントロールすることに主眼を置いて開発した。更に、スピーカーの最適配置をねらい開発初期段階から車両構造へ反映することも行った。

新型MAZDA3では前世代商品群を凌駕する音響性能をもつシステムを開発することができたので、その概要を紹介する。

2. 車室内の理想音響

お客様の好みの音は多岐にわたることから、一つの音を理想として定めることはお客様のニーズにそぐわない。そこでマツダは、お客様の好みの音を聴くための土台となる次の2項目を理想に近づけることが重要であると考えた。

- ・音源に入っている情報を正しく伝える
- ・ダイナミックレンジの拡大

2.1 音源に入っている情報を正しく伝える

音楽は芸術作品でありアーティストやレコーディングエンジニアが聴かせたい音が録音されている。マツダは、その意図した音を細部にわたり精巧に再生させることが“音

*1, 4~5 情報制御モデル開発部

Infotainment and Control Model Development Dept.

*2~3, 6 電子性能開発部

Electrical & Electronics Performance Development Dept.

源に入っている情報を正しく伝える” ということにつながると考えている。精巧に再生された音は楽器や歌声の臨場感や深みを感じることができる。マツダは、その音を再現できる試聴室 (Fig. 1) を所有しており、試聴室で聴く音を“音源に入っている情報を正しく伝える”音として定義した。また、録音された音源はスピーカーから再生された音を直接聴くことを前提で造られており、試聴室もその状態で聴くことができる構造になっている。理想の音を造るには、直接音重視で視聴できる構造が重要になる。



Fig. 1 Sound Testing Room

2.2 ダイナミックレンジの拡大

人間の聴覚は 20Hz~20kHz の周波数帯域で最少可聴閾値の 0dB SPL から最大可聴閾値の約 120dB SPL (周波数により異なる) まで聴く事ができ⁽¹⁾、この範囲で人は音楽を聴いている (Fig. 2)。あらゆる走行シーンにおいて、お客様が常に良い音を聴くことができる状態にするには、ダイナミックレンジを広げ、可聴帯域の全範囲で S/N の良い音を聴くことができる車両を開発することが必要である。

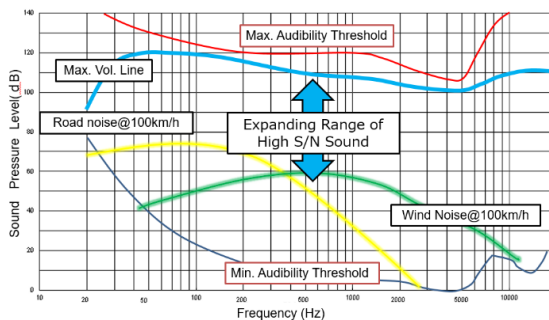


Fig. 2 Audibility Range

そのためには、①走行ノイズの低減、②最大可聴閾値付近まで低歪で再生できるスピーカーとレイアウト、③再生音により異音を誘発させない車両構造の 3 つを実現しなければならない。

3. 理想音響を創る考え方

人の可聴帯域は 20~20kHz と幅が広く、周波数により聴こえ方、音の伝搬が異なる。したがって、周波数による振る舞いの違いを把握し、最適な位置にスピーカーを配置することが重要になる。そこで、音の帯域を 20Hz~200Hz の低域と 200Hz~20kHz の中、高域に分け、音の聴こえ方、

音の伝搬、スピーカー構造の観点からそれぞれの理想構造を考えた。

3.1 低域再生

人間の聴覚は、周波数が低くなるにつれ音の到来方向を認知しにくくなる。車室内での音の到来方向について実験的に調べると、左右前後の方向が認知できるのは 70Hz 以上、上下については 200Hz 以上であった。したがって、ステレオ再生するには左右のスピーカーから 70Hz 以上の音を再生する必要がある。また、200Hz 以下の音のみを再生するスピーカーであれば、低い位置に配置しても定位感を損なわれることはない。

音の伝搬では、閉空間で発生する定在波が大きく影響する。定在波には腹と節がある。節は逆位相の音波が重なりあい振幅しない場所であるが、この節の位置にスピーカーを配置するとスピーカーの再生音が位相反転した反射音と干渉し音圧が低下してしまう。特に波長の長い低域は、定在波の節と腹の間隔が広がるためスピーカーの位置による音圧への影響が大きくなる。この定在波の影響を可視化するため CAE 解析を行った。従来スピーカーを配置していたドア付近は 100Hz~200Hz 辺りで節となり再生効率が悪く、車室内の隅は腹となり再生効率が良くなることが判明した (Fig. 3)。

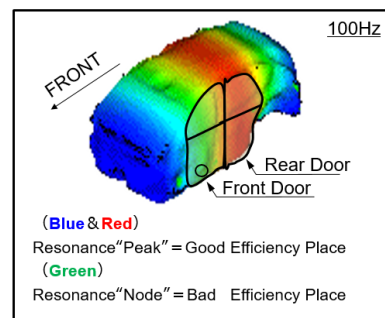


Fig. 3 Resonance of Cabin @100Hz

更に、CAE 解析を裏付けるため小口径のボックススピーカーをドアと車室内隅に配置し音圧レベルを比較すると、CAE の予測どおり車両隅で音圧レベルが上昇した (Fig. 4)。これらの結果より、低域再生用スピーカーは、車両隅であるカウルサイド下に配置することが理想と考えた。

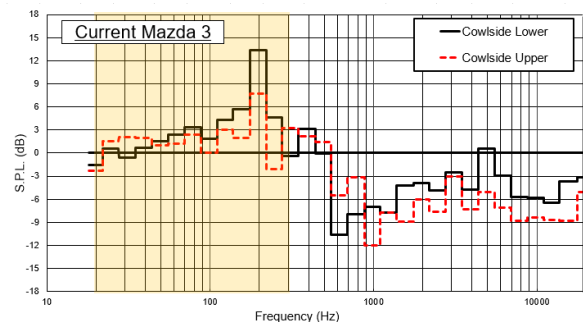


Fig. 4 Difference S.P.L. of Cowl-Side Layout

カウルサイドは周波数に対する形状の変化が少ない、いわゆる、動剛性がよい場所でもある (Fig. 5)。加えて、ドアにあるハンドルやウインドウレギュレーターのような可動物もなくスピーカー振動による異音の誘発を起こさない理想的な場所でもある。

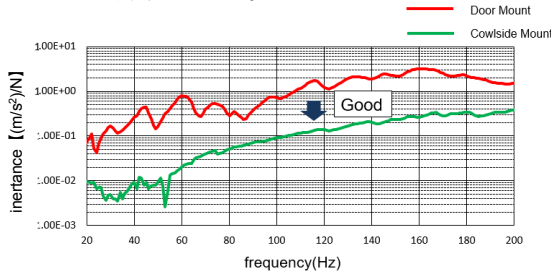


Fig. 5 Stiffness of Door vs Cowl-Side

カウルサイドへのスピーカー配置は遮音性能も向上させる。遮音性能は、ボディの穴や隙をなくし多重壁にすることで向上する。ドアからカウルサイドにスピーカーを移動することで、ドアスピーカーの取付け穴を廃止できる。これにより、ドアのアウトパネルとインナーパネルで多重壁を構築することができ、遮音性能が向上する。

次に、カウルサイドで低域再生するのに最適なスピーカー構造を考える。スピーカーの再生帯域は振動板の重さで決まり、重くなるほど低い音を再生できる。音圧は振動板半径の2乗と振動板の振動速度に比例する⁽¹⁾。つまり、低域については口径が大きい方が効率良く再生できる。それから、低域の音は回折しやすいためスピーカー前後に干渉を防止する遮蔽板が必要となる。一般的にはボックスにより前後の音を遮蔽するが⁽²⁾、低域再生用スピーカーでは空気パネの影響を小さくするため大容量のボックスが必要となる。前世代商品群では、大口径スピーカーとドアシェルを活用した大型ボックス構造で低音再生を機能させていたが、カウルサイドには大型ボックス構造を造る空間はなく、小型ボックスで効率よく低域再生できる構造が必要となる。そこでパスレフ型 (ヘルムホルツ共鳴を利用したポートで低音を増幅させる構造) と呼ばれる構造⁽²⁾で低域再生能力の検証をした。Fig. 6 はパスレフ型において、スピーカー口径とボックス容量の変化により再生できる最大音圧レベルの変化を示したグラフである。

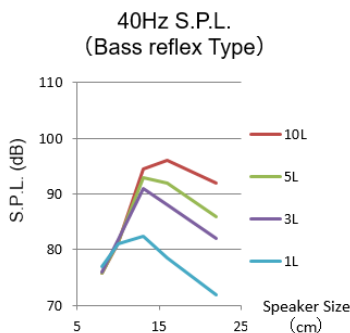


Fig. 6 Relation of S.P.L. @ 40Hz

20Hz までの重低音を聴くためには 40Hz で 95dB 以上の音圧が必要となるが、そのためには、口径 10cm~13cm のスピーカーと内容積 10 リットルのバスレフ型のボックスが必要となる。これらの結果から、10 リットル以上バスレフ型ウーファーをカウルサイドに配置することが理想であると考えた。

3.2 中域・高域再生

人は左右の耳に入る音の時間差と位相差で到来方向を判別している。そのため、波長が短い中、高域の音は、到来方向を認知しやすくなる。そして、マツダの試聴室を含む一般的なホームオーディオでは、スピーカーを耳位置程度の高さで左右対称に配置し受聴者の方向に向け、スピーカーから再生される直接音を主体に聴きこくことで音源に入っている情報を正しく認知できる。一方で前世代商品群は、インストゥルメントパネル上面に中高域再生用のスピーカーを配置していた。この配置では、スピーカーの再生音は必ずフロントガラスに反射する。ガラスとスピーカーの距離も近いため、直接音と反射音が干渉し合った音を聴くことになる。直接音と、時間的遅れのある反射音とが合成された干渉音は、受聴点において、音源の音に対し①歪を生じる、②周波数特性が乱れる等、明瞭度を劣化させる原因となる。これはCAE解析でも可視化ができた。Fig. 7はスピーカーをインストゥルメントパネルとドアそれぞれに配置し、4kHzの音を出力した状態のCAE解析結果である。インストゥルメントパネル配置は受聴点での干渉縞が深くなっているが、ドア配置は比較的浅い。これは、ドア配置のような直接音重視の配置では、干渉波の影響が少なく周波数特性をフラットにでき、再生された音を正確に聴くことが可能となることを示している。

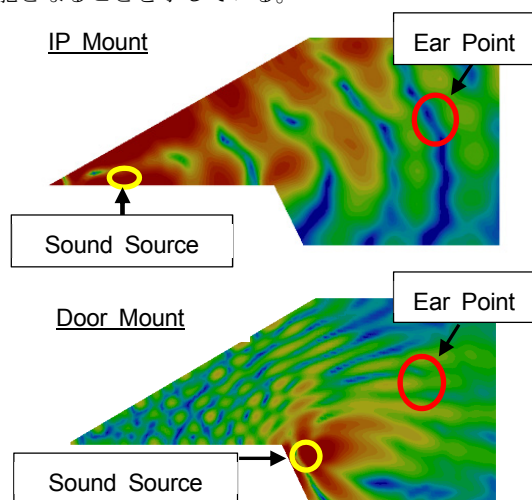


Fig. 7 CAE Result of IP Mount vs Door Mount

更に、直接音を主体に聴くためには、スピーカーを小型化しレイアウト自由度を上げることが重要になる。小型化は、スピーカー自身で生じる歪の抑制にも効果的である。

スピーカーは分割共振やエッジの逆共振により音源に含まれる音とは異なる音を発生させる。これはスピーカーの振幅速度が速くなる中、高音域で発生しやすい^①。この音を抑制するには、振動板を小口径にして軽量化を行い、高速で振動板を動かすことが効果的となる。しかし、振動板を軽量化すると共振周波数が上昇し再生帯域が狭まるため、200Hz～8kHz程度までを再生させる中域再生用スピーカー（スコーカー）と、8kHz程度以上を再生させる高域再生用スピーカー（ツイーター）の構成とし、搭載位置は、直接音が主体となる場所で、より小型なツイーターは耳の高さに合わせることを理想と考えた。

一方で、車室内の音響は座席の位置関係により必ず左右のスピーカー配置が乗員に対し非対称になるため、理想を実現することが難しい。ステレオ音源では受聴者に対してスピーカーを左右対称に配置することで定位感や広がり感を正しく再現できるのだが、非対称に配置すると正しく再現できなくなる。この現象は、人の聴覚の特徴である先行音効果が働き発生する^②。先行音効果とは、複数の同一音が再生された場合、先に届いた音の方向に定位してしまう現象である。車室内では、この現象により耳に近い方のスピーカーに音の定位感がシフトし、広がり感が狭くなる。これに対してはDigital signal processor (DSP) による時間と位相の制御で疑似的に左右の距離差を均等にする技術により、理想を実現できると考えた。

4. 新型MAZDA3での実現手段

車室内の理想音響実現するために必要な要素は①10リットル以上の容量を持つバスレフ型ウーファーのカウルサイド配置と②中高域再生用スピーカーの直接音重視の配置である。新型MAZDA3では、これらの必要な要素を車両に搭載可能な構造にしてサウンドシステムを構築した。Fig. 8にその新型MAZDA3のサウンドシステムを示す。

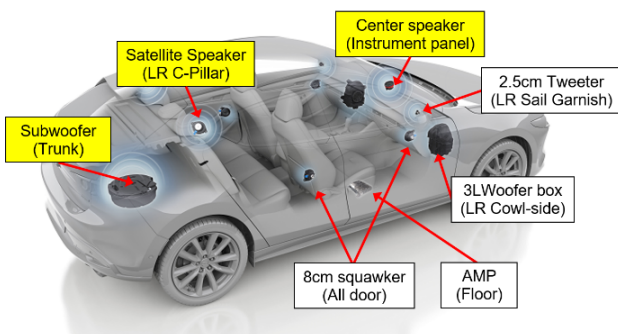


Fig. 8 All-New Mazda3 Sound System

新型MAZDA3のサウンドシステムでは“車室内の理想音響の考え方”に沿って、低域、中域、高域それぞれの帯域に再生用スピーカーを割り当てた。ツイーターは2.5cmで8kHz以上、スコーカーは8cmで200～8kHz付近までを再生

可能とするユニットを開発した。ウーファーは、60～200Hz付近まで再生可能となる容量3リットルのバスレフ型ボックスウーファーを開発した。これらのスピーカーで構築したサウンドシステムは音楽を聴くには十分な帯域60Hz～20kHzを再生可能とし、MAZDA Harmonic Acousticsと名付けた。更に、上級グレードのシステムにはサブウーファー、センタースピーカー、サテライトスピーカーを追加した。インストゥルメントパネル中央の8cmのセンタースピーカーは助手席や後席の定位感の向上を可能にし、トランクのサブウーファーは重低音領域の再生を可能にすることで、理想の音響性能へ近づけた。この新型MAZDA3のサウンドシステムにおいて軸となる次の2項目について詳しく述べる。

- ・3リットルウーファーのカウルサイド配置
- ・中高域再生用スピーカーの配置

4.1 3リットルウーファーのカウルサイド配置

カウルサイド下部に10リットル以上の容量を持つバスレフ型ウーファーを配置し、20Hzまでの重低音を再生できるようにすることが音響的には理想である。しかし、車両のカウルサイドは、①アクセル操作を行うスペース②電装品、ハーネス、HVAC、インシュレーター等の部品スペース③インストゥルメントパネル搭載用治具のスペースなどの制約条件があり、大型のバスレフ型ウーファーを配置する物理的空間を確保することは非常に難しい。加えて、音響的に理想であるカウルサイド下部は、アクセル操作スペースとボディーパネルに挟まれており、スピーカーユニットを配置する空間確保が困難な部位である。そこで新型MAZDA3では、まず、限られたスペースを効果的に活用するため、カウルサイド上部にウーファーを配置し、その周囲にハーネスを配策した。従来カウルサイド上部に配置していた補器類はカウルサイド下部に配置した (Fig. 9)。

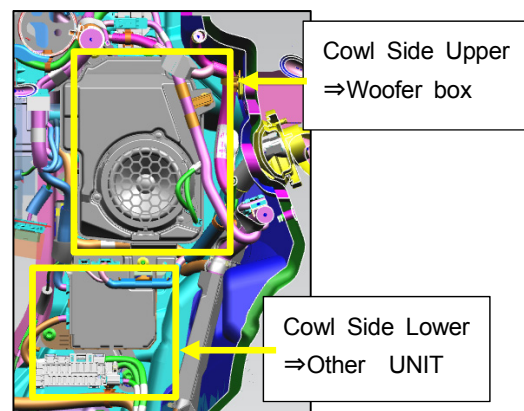


Fig. 9 Cowl-Side Aria Layout

次に、カウルサイド上部で最大限容量を確保するため、次の施策を開発初期から織り込んだ。①ヒンジピラーイン

ナーの車室外側移動, ②HVACの小型化, ③ハーネス経路変更, ④インストゥルメントパネル搭載治具の小型化。そして, ヒンジピラーからドアへハーネスを貫通させるための開口穴も利用し, ヒンジピラー内部にボックスを拡張した。これらの施策により, カウルサイド上部に3リットルバスレフ型ウーファーを配置できる空間を確保した (Fig. 10)。

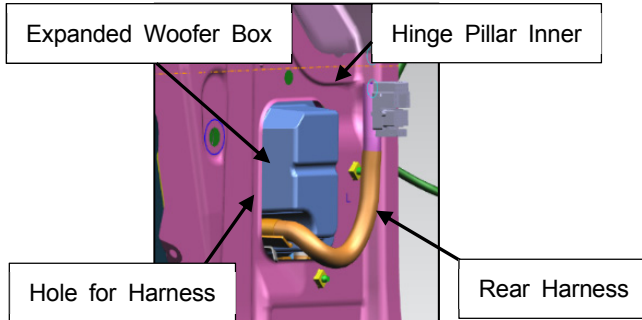


Fig. 10 Expanded Woofer Box by Cowl-Side Structure

この3リットルのバスレフ型ウーファーで可能な低域再生能力を検証した。可聴限界である20Hzから再生させることが理想ではあるが, 3リットルでは現実的ではない。そこで, 低域の量感を感じやすい帯域である60Hz~200Hzに焦点を当て, 低域再生することにした。それから, ボックス容量の影響を受けやすい60Hz~100Hzの音圧レベルを予測して低域再生能力を見極めることにした。

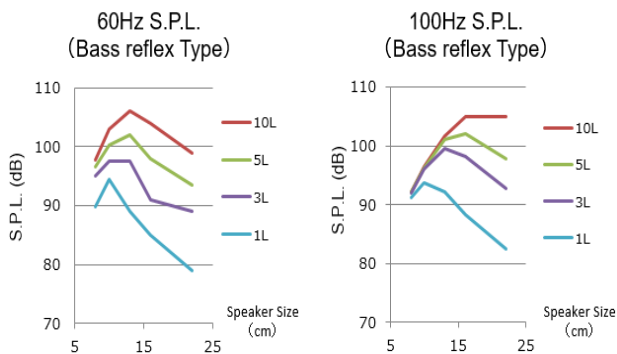


Fig. 11 Relation of S.P.L @ 60Hz and 100Hz

Fig.11は60Hzと100Hzでの音圧レベルを予測したグラフである。3リットルでは10リットルのバスレフ型ウーファーとは10dB SPLの差はあるものの, マツダが必要としている音圧レベルである95dBは再生できることが予測できた。口径は10cm-13cm程度のサイズが最適であると判断した。

机上検証の結果を踏まえて試作品ウーファー (Fig. 12) を製作し, 実車による聴感評価を行った。結果として, 低音の量感は十分に得られていることを確認できた。更に, 専用エンクロージャを持つウーファーは, 従来のドアマウントのウーファーに比べメリハリのある低音を再生すること

ができた。これは, 剛性の高い専用エンクロージャにより, 箱の共鳴を抑えたことで入力電気信号に対する音響再生の応答性が良くなった結果と考えている。この試聴結果から3リットルウーファーで前世代商品群に比べ量感も応答性も良い低音を再生できると判断した。

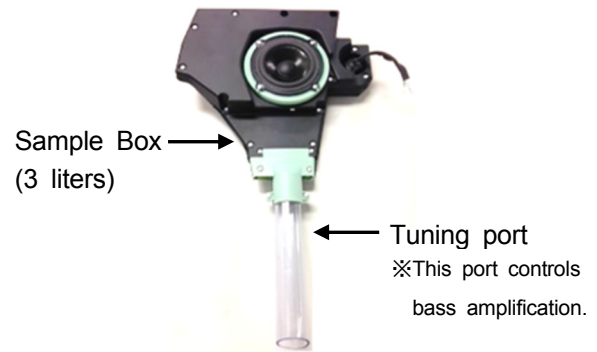


Fig. 12 3L Woofer Box Sample

4.2 中高域再生用スピーカーの配置

中高域再生用スピーカーとなるツイーターとスコーカーは前述のとおり直接音重視で配置することを前提にした。更に, 音楽を聴く上で重要な要素である定位感, 広がり感も視野に入れ配置場所を検討した。そのために, 乗員耳位置を中心に距離, 高さ, 角度の条件を設定し, デザイン造形と音響性能の両立できる場所を模索した。

ツイーターはAピラーとセールガーニッシュ二つの候補場所があったが, デザイン造形, 視認性, デミダクトの晴れ性能に影響を与えず, 乗員方向に向けて配置できるセールガーニッシュを選択した (Fig. 13)。



Fig. 13 Tweeter Location

スコーカーは, 配置可能な空間があるドアでデザイン造形, 遮音構造と音響性能の両立できる場所に配置した。

デザイン造形と音響性能の両立: 音響性能の視点だけでスコーカー配置を考えると, 耳の高さに可能な限り近い位置で, 音像が偏らないよう聴取者から適度に離れた位置に配置することが重要である。更に, フロント用スコーカー設置場所は音像定位を考慮するとツイーターに近い方が良い。しかし, その位置ではインストゥルメントパネルからドアに続くデザイン造形に対する影響が大きい。そこで, デザイン造形を崩さず音響性能が成立する位置としアームレスト前付近に配置した (Fig. 14)。



Fig. 14 Squawker Location

遮音構造との両立：遮音はボディーの穴や隙をなくし多重壁にすることで性能が向上する。新型MAZDA3ではドアに多重壁構造を採用し遮音性能を向上させている。そこで、スピーカー配置場所も多重壁構造にするため、ドアインナーパネルに穴を開けなくとも空間のある場所に配置した。リアドアはチェッカーの取り付け作業穴を塞ぐホールカバーを活用し遮音構造とスピーカー配置を両立させた (Fig. 15)。

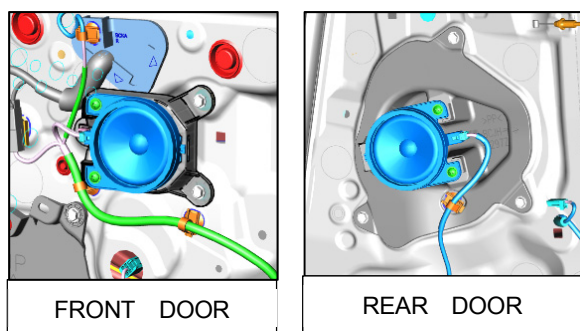


Fig. 15 Squawker Mounting Structure

スピーカーをドアインナーパネルに穴を開けずに配置することは音響性能からしてもメリットがある。パネルに穴を開けて取り付ける場合、防水加工が必要になる。防水加工は、振動板に樹脂を含侵させる必要があり音質に影響を与える。パネルに穴を開けない構造にすることで、振動板材料の選択肢を拡大することが可能となり、スピーカー単体性能を向上させることができた。

5. 新型MAZDA3音質の仕上がり

新型MAZDA3のサウンドシステムでは、中高音で直接音を主体とした音作りを行った結果、音の細部までしっかり再生できるようになり、明瞭度を飛躍的に向上させた。加えて、DSPの制御を活用し、ドライバーモードとオールモードの二種類の音響空間モードを設定した、これは、車両の使用シーンに合わせて常に良い音を聴くことができるためのモードである。ドライバーモードは、ドライバーの耳位置で最も良い音が聴こえるように時間と位相を調整した。オールモードは全席で均等な音質で聴くことができるように運転席と助手席の耳位置の中間点で時間と位相を調整した。低音については、3リットルのバスレフ型ウー

ファーをカウルサイド上部に配置する事で、量感を十分に感じつつ応答性のある低音再生を実現した。前世代商品群では標準化していた低音再生用スピーカーのドア配置をカウルサイドへの移設したことは、車室内の騒音レベルの低減にも貢献した。この効果はオーディオの音が際立つ方向にもつながった。更に、オーディオやハンズフリー通話音などスピーカーから出力される音が車室外に漏れにくくなり車全体の質感を高めることができた。

6. おわりに

新型MAZDA3のサウンドシステムを開発するにあたり、“お客様に聴いていただきたい音は何か？”を熟考した。理想の音を目指し車室内の音場をコントロールする事が重要であると考え、音響工学的にスピーカーの最適位置を探索した。車室内の音場の変化を理解するために、人間の聴覚の仕組みから、室内音響工学、スピーカーのメカニズムなどを調査し、測定、CAEを行う技術も高めた。サプライヤーの方々にも難しい条件の中で素晴らしいスピーカーを開発いただいた。結果、新型MAZDA3のオーディオサウンドは、従来の開発車種を卓越した性能とすることができた。新型MAZDA3に乗車されたお客様には、音楽を通してドライブングを楽しんで頂ける事を期待する。最後に、この開発にあたって多大なご支援をいただいた社内外の関係各位に対し、深く感謝致します。

参考文献

- (1) 山本武夫編著：スピーカ・システム，上巻，(株)ラジオ技術社，p17-20，p58-63，p154-157
- (2) 監修 佐伯多門：新版スピーカ&エンクロージャ百科，(株)誠文堂新光社，p108，p118
- (3) 平原達也共著：音と人間，コロナ社，p191

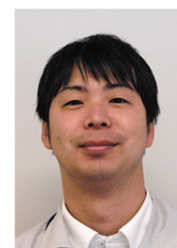
■ 著 者 ■



六浦 潔



若松 功二



山中 尋詞



平尾 幸樹



西嶋 孝祥



手島 由裕