

特集：新型MAZDA3

13

新型MAZDA3サイドドアの静粛性開発 Quietness Technology for All-New Mazda3 Side-Door

高谷 洋隆*¹ 高橋 信之*² 雪田 恭兵*³
Hirotaka Takaya Nobuyuki Takahashi Kyouhei Yukita
黒木 大史*⁴ 松並 裕美子*⁵
Daishi Kuroki Yumiko Matsunami

要 約

新型MAZDA3の開発にあたり、ドア開発チームは、「静粛性」をドアシステムの中心性能と位置づけ、開発を行った。狙いとする性能は、以下3つの技術コンセプト「① 面の連続化+通気経路のゼロ化による空力騒音の低減」、「② 質量則使い切り+多重壁化による透過・伝ば音の低減」、「③ ガラスの膜振動最小化によるドアガラスからの透過音低減」を適用し、具体化した。空力騒音の低減に対しては、キャビン周りで発生する空気渦を抑制するため、サッシュやピラーガーニッシュの段差や形状を適正化した。更に、通気をなくした新構造の OUTER ハンドルを採用した。透過・伝ば音の低減に対しては、シールの連続性とベルトライン下インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化を追求した。インナーパネルエリアに関しては、「直通の穴」と「透過損失の穴」を無くす取り組みを行った結果、透過損失のロスを従来の半分以下とし、総質量を殆ど増加させずに遮音性能を向上させた。車両全体での徹底した穴隙ゼロ化の取り組みにより、背反性能であるドア閉まり性との両立が問題となったが、この問題に対しては、「ドア開閉連動の空調制御」と「閉まり性を向上させたドアチェッカー」の適用により、静粛性を一切犠牲にせず、滑らかで心地のよいドア開閉操作性とを両立させた。

Summary

For the development of the All-New Mazda3's door system, we regarded "Quietness" as central performance and developed it. We realized the performance of the aim by three technical concept. We improved a step and the shape of a sash and the pillar garnish to control an air vortex to occur around a cabin. Furthermore, we developed outer handle of the new structure to zero air leak. We reduced a sound to come in from around door by losing a hole and the gap of the inner panel and sealpart. In the inner panel area, efforts to eliminate the "direct hole" and "transmission loss hole" have reduced transmission loss to less than half of the conventional level and improved sound insulation performance without increasing the total mass. Due to thorough efforts to eliminate the entire vehicle gap, compatibility with contradictory door closing performance is becoming a problem. By applying a door checker with improved performance, the door can be opened and closed smoothly and comfortably without sacrificing quietness.

Key words : Vehicle Development, Vibration, Noise, and Ride Comfort, Quietness, Side Door

1. はじめに

「走る歓び」を乗車している方全てに体感していただくためには、「クリアに会話できる車内の静粛性」は非常に重要な要素である。新型MAZDA3の開発にあたり、サイドドア（以下ドア）開発チームは、「静粛性」をドアシステムの中心性能と位置づけ、開発を行った。本報では、開発のねらいと導入技術について、紹介する。

2. 開発構想と導入技術

2.1 めざす姿と性能目標

静粛性開発を進めるにあたり、開発メンバー全体でありたい姿を共有化した。第一に「ドアを閉めた瞬間に感じる静粛感の高さ」、第二に「走行時は、外乱による音の変化が少なく、どんな車速でもクリアに会話ができる」である。前者は、ドアを閉めたときに感じる静粛感に加え、「クルマ

*1～5 ボデー開発部
Body Development Dept.

によって、護られているという心理的な安心感」、後者は静粛な空間によって感じる「快適性・居心地の良さ」をお客様への提供価値としている。続いて、具体的な車両の性能目標を設定した。快適性を測る指標として、CX-9の開発から適用している「会話明瞭度」を縦軸に、「荒れた路面での音圧」を横軸にとった指標を適用し、新型MAZDA3では静粛ゾーン内に性能目標を設定した（Fig. 1）。

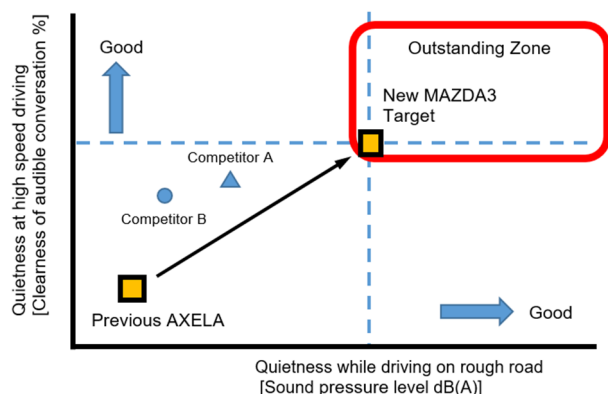


Fig. 1 Quietness Chart

続いて、車両を構成する各システムに対し、必要遮音量の配分及び目標設定を行った（Fig. 2）。

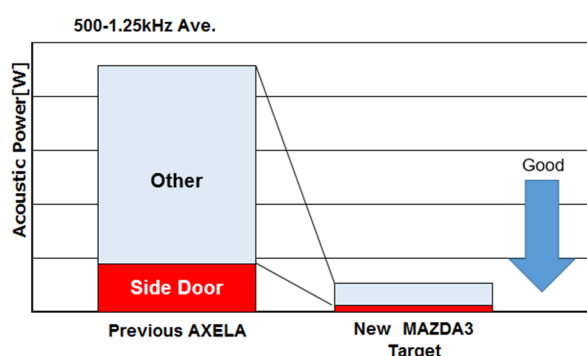


Fig. 2 Sound Insulation Target

この目標性能を実現するにあたり、2つの取り組みを行った。第一に、音源の低減である。車両の音源は、「エンジン音」「タイヤ音」「空力騒音」に大別できるが、ドアは「空力騒音」への影響が大きい。第二に、車内に透過・伝ばしてくる音の低減である。音は「空気伝播音」と「固体伝播音」に分類できるが、ドアは「空気伝播音」に対する影響が大きく、「タイヤ音」と「空力騒音」が車内に進入する割合のおよそ半分をドアが占めることが分かっている。次節ではその性能をどのように達成したのかを述べる。

2.2 達成シナリオ

ねらいとする性能の達成手段を具体化するにあたり、マツダが大切にしている2つの考え、第一に「人間特性から目標設定する」、第二に「物理現象を理論から制御因子を

突き止める」を基に、3つの技術コンセプトを決定した（Fig. 3）。

第一に、音源となる空力騒音に対し、「面の連続化+通気経路のゼロ化」、第二に、室内へ透過・伝ばする音に対し、「質量則使い切り+多重壁化」、第三に、乗員の側面にあるドアガラス部分からの透過音に対する、「ガラスの膜振動最小化」である。これら技術コンセプトから構造化までの取り組みを次項で述べる。

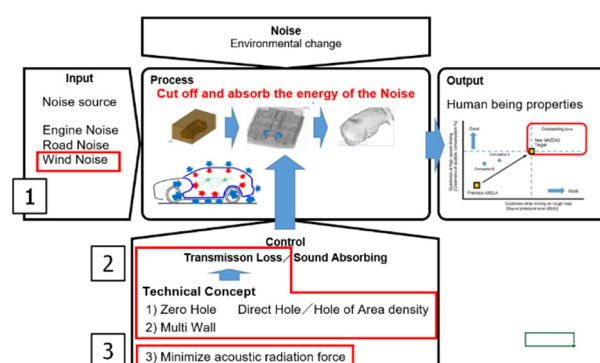


Fig. 3 Technical Concept of Side Door

2.3 空力騒音の低減

走行中に発生する空力騒音は、ドアの形状や構造との関わりが深い。キャビン周りで発生するエネルギー損失量は空気抵抗になるだけでなく、一部が空力騒音となって車体を伝ばし、乗員に騒音として伝わる事が分かっており、車室内の快適性向上のためには、発生する渦を抑制し、空力騒音を低減する必要がある⁽¹⁾。渦の発生を抑制するためには、車両周りを流れる空気の流れを速度を変化させないことが重要だが、その重要な因子が車両外郭の形状である。また、車両にある小さな穴や隙から、流速の早い室外へ空気が吸い出される際に発生する通気音に対しては、先代アクセラでは、ドアのアウトターハンドル周りが音源になることが評価により分かっている。これらに対する、新型MAZDA3の取り組み内容を以下に示す。

(1) ドアサッシュ周り

サッシュ周りの形状や構造は、外観デザインをはじめ、静粛性や居住性など、多岐にわたる機能を考えながら決定している。新型MAZDA3の開発では、特に空力騒音とシールによる遮音の機能に対し、各々の理想の姿と崖を明確にし、構造化を進めた。

まず、空力騒音に関しては、ピラー／サッシュ／ガラス面のフラッシュサーフェスを理想状態と位置づけ、キャビンとサッシュの段差、サッシュとガラス面の段差のミニマム化を追求した。サッシュ周りの形状は、形状決定に関わる因子と因子ごとの渦の大きさに対する寄与度、及びそれらの数値の崖を検証し、具体的なガラス面からBピラー／ガーニッシュまでの段差高さや、ガーニッシュ前側の勾配角度に反映した（Fig. 4）。また、過去の知見⁽²⁾より、Aピ

ラーとフロントドアサッシの隙間と段差部に起因する騒音の対策として、パーティング隙を塞ぐパーティングシールが有効であることが判っている。この知見に基づき、キャビン周りの各パーティング隙部へ、パーティングシールを設定した。

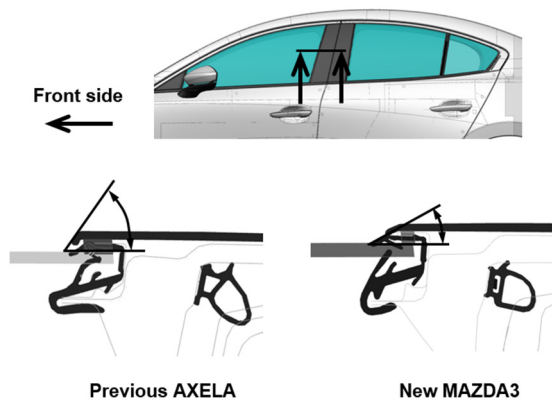
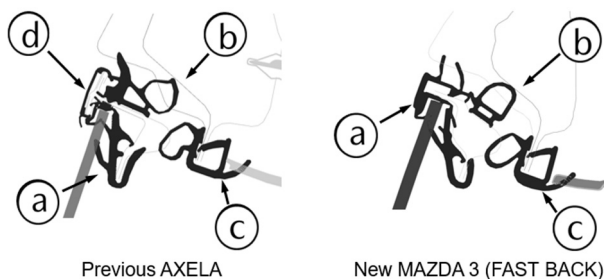


Fig. 4 Section of B-pillar Garnish

これらの機能を最小の寸法と物理量で実現するため、新型MAZDA3では、マツダ初の「熱可塑性エラストマー（TPE）製ガラスランチャネルによるヒドダウンサッシ構造」を開発・採用した。先代アクセラのサッシ構造との大きな違いは、部品に対する機能配分である。従来構造は、ドアガラス保持はガラスランチャネル、シール機能はウェザーストリップ、外観意匠はサッシュモールというように、部品ごとに担う機能を設定していたが、新構造ではガラスランチャネルへ従来から有するドアガラス保持機能に加え、サッシュモールの持つ外観意匠とウェザーストリップが担っていたパーティングシール機能を集約、ウェザーストリップはプライマリーシール機能のみに特化し構造を簡素化、サッシュモールは廃止した。本構造により、ドアガラスとサッシの段差縮小や、窓枠の幅を先代アクセラ比で20%細くし、意匠性も向上させた（Fig. 5）。



| Function | Previous AXELA | | | | New MAZDA3 | | | |
|------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | (a) Glass-Run Chunnel | (b) Weather strip | (c) Walt seaming | (d) Molding sash | (a) Glass-Run Chunnel | (b) Weather strip | (c) Walt seaming | (d) Molding sash |
| Primary seal | | ● | | | | ● | | |
| Secondary - seal | | | ● | | | | ● | |
| Parting Seal | | ● | | | | ● | | |
| Window Seal | ● | | | | ● | | | None |
| Guide Side Glass | ● | | | | ● | | | |
| Styling | | | | ● | | | | ● |

Fig. 5 Relationship between Functions and Door Parts

(2) アウターハンドル

「通気経路ゼロ化」の技術コンセプトに基づき、通気による車外騒音発生を抑制した、新構造のアウターハンドルを開発した。空力騒音に関しては、先述の通り、「渦に起因するもの」と「通気に起因するもの」に大別できるが、先代アクセラのアウターハンドルに関しては、後者が支配的であった。これは、グリップ部分の可動に必要な隙をキャップとの間に設けていることで、走行時にその隙間から空気が吸い出される現象が発生していたことが要因である（Fig. 6）。

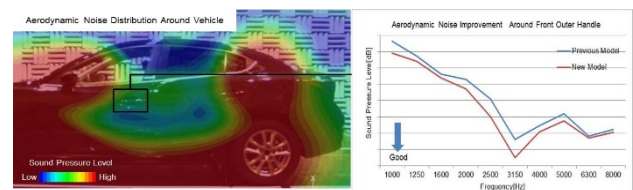


Fig. 6 Wind noise around Outer Handle

今回開発したアウターハンドルは、グリップ部分をキーシリンダー部分まで一体化にするとともに、グリップとドアパネルとのタッチ面をハンドルシートでシールする構造とすることで、通気音の発生を無くした。また、キーの挿入部を意匠面に出不さない構造や、アドバンストキーレスエントリー操作ロック/アンロックスイッチのタッチセンサ化によって、マツダデザインが掲げる「引き算の美学」との両立を図った（Fig. 7）。

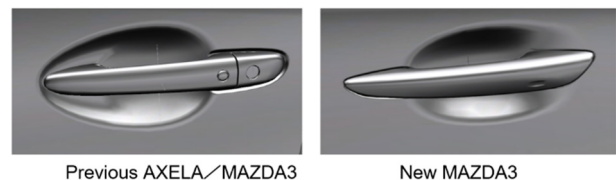


Fig. 7 Outer Handle Appearance

2.4 室内へ透過・伝ばする音の低減

この節では、技術コンセプトである「壁の穴隙ゼロ化」と「多重壁化」によって、音の伝ば・透過を抑制する考え方と構造を説明する。まず「壁の穴隙ゼロ化」に関しては、隣接する部品同士の合わせ部やシール部分に至る全ての領域で徹底的な構造対策を織り込みした。その中で特に注力した「シールの連続性」と「インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化」について、詳しく説明する。

(1) シールの連続性追求

技術コンセプトである「壁の穴隙ゼロ化」はシールの理想状態である、「必要なシール圧とシール幅を保ち、連続シールする」にも通じる考え方であり、シールに対しても同コンセプトを適用し、開発した。

理想のシール状態を実現するには、シール部品側だけでなく、シールする相手側部品との関係が重要である。サイドドアにおいては、プライマリーシールとして、ドアウェザーストリップ、セカンダリーシールとして、シーミングウェルトを設定している。ウェザーストリップに関しては、先述のヒドゥンサッシュ構造化により、担う機能をプライマリーシールに特化したことで、サッシュ部分での断面切り替えを不要とし、一断面でドア全周をシールするようにした (Fig. 8)。

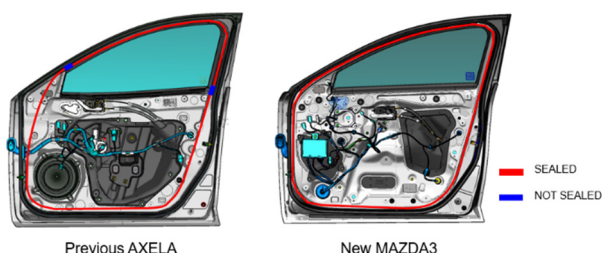


Fig. 8 Secondary Seal Layout

シーミングウェルトに関しては、先代アクセラは、ベルトラインから上側はサッシュ、下側はドアトリムとシールする構造としていたが、サッシュからドアトリムへシールを切り替える部位において、シーミングウェルト／ドアパネル／ドアトリム間に僅かな隙が生じ、音の侵入経路となっていた。新型MAZDA3では、ベルトラインの下側もインナーパネルに対しシールする構造へ変更し、シールコンディションが全域で変化しない理想的なシールとすることで、静粛性を向上させた。本構造の実現にあたっては、基本断面の変更だけに留まらず、ドアハーネスの配線経路もドア前側のフロントパネルを貫通する構造へ変更した。

(2) インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化

物体の持つ遮音性能 (透過損失) の優劣は物体の持つ質量に依存する、いわゆる質量則が知られているが、その透過損失に関して、「面積比で僅か 1% の穴や隙 (以下、穴隙) を有しているだけで、本来有する透過損失を大きく損失する」ことを過去技報で報告している^②。ここで述べている穴隙は、遮音の観点から、以下の2つに定義することができる。第一に、内外を隔てる物質的な壁が存在しない「直通の穴」、第二に、物質的な壁は形成しているものの、壁の中で単位面積当たりの密度 (以下、面密度) が低くなっている箇所、「質量則の穴」である。見た目には音の通り道が無い状態であっても、質量則の穴があれば、そこから音が透過し、遮音機能は著しく低下し、本来壁の有する質量で得られるはずの透過損失が得られない状態となる。新型MAZDA3の開発では、従来から取り組んでいる「直通の穴」の潰し込みに加え、持っている機能が無駄なく使いきるために、「質量則の穴」に着目した。また、開発に先駆

け、ドアの遮音実力と弱点を明確にするため、先代アクセラ同様構造 (以下、先代構造) のドアを用い、残響無響室にて遮音量の計測および音の弱点の可視化を行った (Fig. 9)。

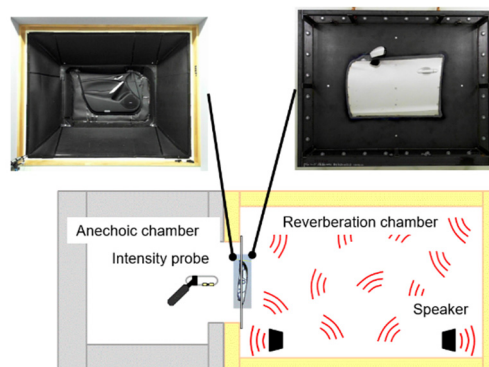


Fig. 9 Reverberation Anechoic Chamber

残響無響室での測定結果の一例をFig. 9に示す。この図は赤色や黄色の部位が音の透過量が多い部位、また赤色は、より強い音圧レベルであることを示している。Fig. 10で示す通り、先代構造はドアスピーカー部とベルトライン周辺部からの透過量が多い。新型MAZDA3では、この2か所を特に重要な部位と位置づけ、取り組んだ。



Fig. 10 Weak Point of Front Door

① インナーパネルエリアの遮音性能向上

先代構造のドアにおいて、車外音の出口として最も寄与が高いのがスピーカー部である。スピーカーは直通する穴隙は皆無だが、壁となっているコーン紙は面密度が低く、「質量則の穴」となっていることが要因である。具体的な影響を机上計算にて算出した結果、インナーパネル部が本来質量則で得られる透過損失に対し、およそ半分をロスしていることが判った。新型MAZDA3の開発では、開発初期段階からNVH実研担当や、オーディオ開発担当らとの共創活動を行い、音響性能とドアの遮音性を解決するための根源的な問題がスピーカー配置であることを認識し、スピーカー搭載位置をドアからカウルサイドへ変更するという、大規模な構造変更を行い、問題を解決した。

また、ドアへ部品を組付する際に必要なサービスホール

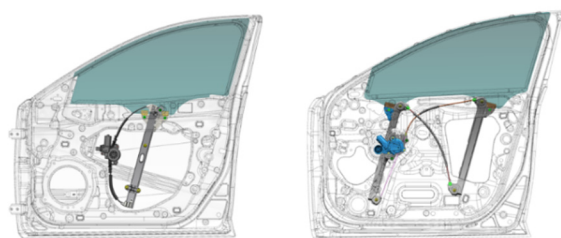
は作業性を犠牲にしない最小限の大きさとし、樹脂製カバーを設定することで、透過損失の穴が生じないよう配慮した。これら取り組みの結果、質量則理論値に対する透過損失のロス先代アクセラに対し、50%低減した（いずれも机上計算値）。

②ベルトライン周辺の遮音性能向上

残響無響室での計測結果の分析により、外で発生した音はベルトライン部ウェザーストリップインナーのリップを透過してくることを突き止めた。これはガラスへの接触面積が少なく、経路上の面密度が低いこと、またリップ形状の薄肉部がいわゆる「質量則の穴」となっていたことが原因であった。対策としてリップの面密度を改善した新しいリップ形状や断面形状を設定した。

2.5 ドアガラスから室内へ透過する音の低減

壁を保持する剛性が低いと、壁自身が振動することで、音響放射によって音が伝達する現象が生じる。これと同様の現象が走行中の車両のドアガラスでも発生している。ドアガラスの振動抑制のため、ガラスを閉じきった状態で、高い保持剛性を得られるように、ベルトラインモールの反力特性やリップ形状の工夫を行った。また、ドアガラスの安定した昇降挙動を保つには、摺動抵抗の変化に対してもガラスの姿勢変化が発生しない、ロバストなシステムが必要である。新型MAZDA3では、ガラスの水平姿勢を安定して保つため、フロントドアにWガイドレール式のレギュレータシステムを開発・採用した（Fig. 11）。ちなみに、挟み込み検知もマツダ初となるセンサレス制御方式を開発・採用している。



Previous AXELA New MAZDA3

Fig. 11 Window Regulator System

3. 相反性能に対する取り組み

3.1 ドア閉まり性

新型MAZDA3では、車両全体で徹底した「穴隙ゼロ化」に取り組んだが、そうすることで影響が無視できないのが、「ドア閉まり性」である。この節では、その取り組みを説明する。

ドアを閉める際のメカニズムをFig. 12に示す。アウトプットである「ドア閉まりの完了」は、「ドアラッチとストライカーが噛み合うこと」であるが、そこに至るまでに、シールの反発力・チェッカーやヒンジの摩擦など、ドア閉

まりを妨げる因子が存在する。中でも最も影響するのが、車室内にある空気がばねとなって、閉まりを阻害する現象、いわゆるエアタイトである。

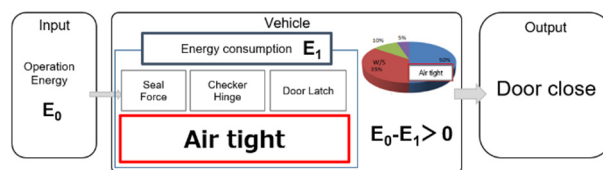


Fig. 12 Mechanism Door Closing

車両のリアバンパー裏には、エキストラクターグリルという空気を抜くための弁を設けており、ドア開閉の都度、車室内の空気を外へ逃がす働きをしている。新型MAZDA3の開発中には、徹底した穴隙ゼロ化により、遮音性向上を果たしたものの、その結果空気抜けが悪化し、エアタイトが増大する問題に直面した。従来の手法では、エアタイトを低減するには、空気抜け量を増加させる、すなわち、エキストラクターグリル開口面積の拡大もしくは弁を解放しやすくする対策を行っていた。しかし、エキストラクターグリルは車外音の進入口になっていることが明確になっており^③、走行時の静粛性が悪化するという背反が生じる。新型MAZDA3では、このような背反する因子の特性を変動させて折衷案を探るのではなく、相互干渉しない新たな制御因子を見出し、機能を両立する取り組みを行った。ドア閉まり性の事例においては、ドア閉めを行う際の時間軸に着目し、静粛性と背反しない制御因子をコントロールすることで、ドア閉まり性を向上させた。詳細を以下に示す。

(1) ドア開閉連動の空調制御技術

ドア閉まり性能を向上させるため、ドアを閉める際に、ブローユニットの通気経路を制御し、車室内の圧力上昇を抑える、マツダ初の空調制御技術を導入した。ドアラッチに内蔵したアジャースイッチによって、ドアが開いたことを検出すると、ブローユニット内にある内外気切り替えシャッターを通気抵抗が最も少ない位置まで作動させ、室内の空気が抜けやすい状態にし、ドア閉めが完了すると、シャッターを元の位置に戻す。この技術により、ドア閉めに要するエネルギーをおよそ10%低減した（Fig. 13）。

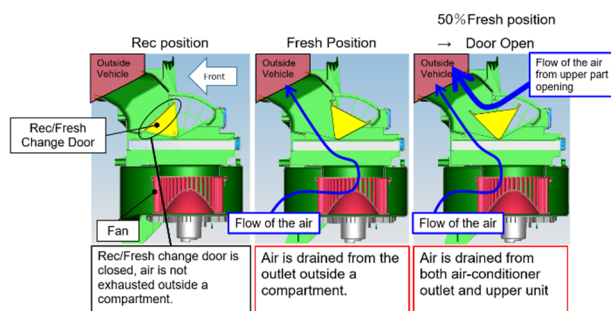


Fig. 13 Operation Explanation of Blower Unit.

(2) 閉まり性向上ドアチェッカー

ドアの閉まり性と開閉操作フィーリングの向上をねらい、スプリング摺動式ドアチェッカーを採用した。先代アクセラでは、小型・軽量が利点である、ラバーの弾性力を利用したラバー摺動式を採用していたが、上記メリットが得られる反面、ラバーの特性上、伸縮で発生するヒステリシスによってエネルギーロスが生じていた。今回開発したドアチェッカーは、内部構成部品の寸法とスプリングの諸元を適正化することで、本体サイズを従来車で使用していたスプリング摺動式チェッカー比でおよそ10%小型化しつつ、スプリングのエネルギー蓄積量をおよそ40%増加させ、開き時に蓄積したエネルギーを閉め時に解放することで、閉まり性を向上させた。また、ドア開き操作時の操作力遷移をアウターハンドル操作との連続性を持たせた特性とすることで、チェッカーの引き込み特性を強くしたドアで発生する、ドアを開ける操作がし難くなる問題も解消し、滑らかなドア開閉フィーリングを実現した (Fig. 14)。

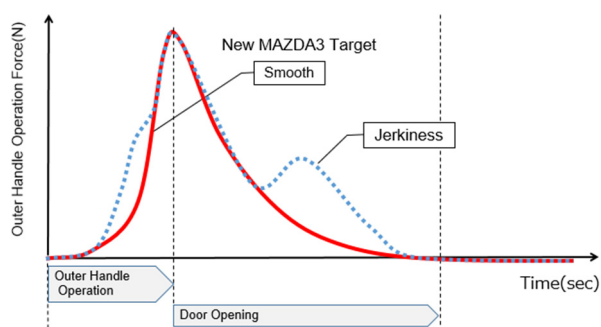


Fig. 14 Ideal Characteristics of Door Opening

4. 達成性能

前述の取り組みにより、車両全体でねらいとする静粛性目標を達成した⁽⁴⁾。ドア周りに関しては、各ピラー周りの空力騒音を先代アクセラモデルに対し、1~4dB低減 (Fig. 15)、遮音に関しては、インナーパネルエリアでは質量を殆ど増加させずに遮音性を向上させた (Fig. 16)。

また、ドアを閉めた際の静寂感に関しては、新型MAZDA3のアピールポイントの一つとすることができた。

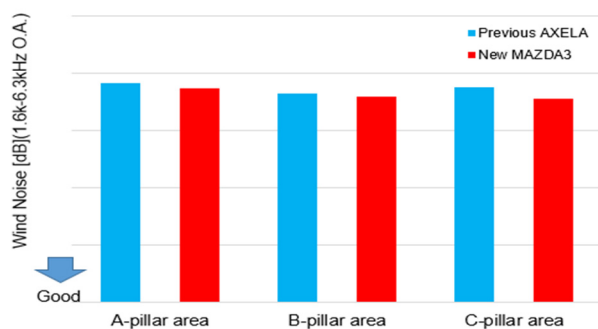


Fig. 15 Wind Noise Level

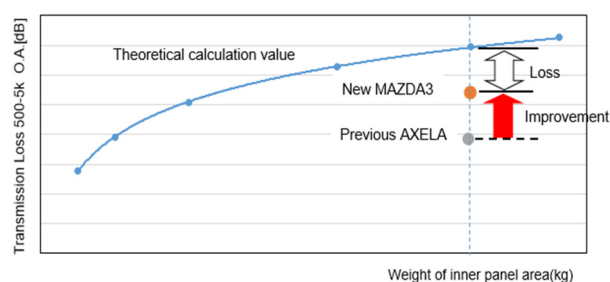


Fig. 16 Comparison with Theoretical Values

背反するドア閉まり性に関しても、閉まりに必要なエネルギーを40%低減した。その他、新造形のアウターハンドルやヒドゥンサッシュ構造の採用による意匠性向上や、スピーカー搭載位置の変更による音響性能向上を実現した。

5. おわりに

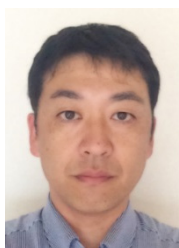
新型MAZDA3のドア開発にあたり、最も大切にする機能を端的に示すキーワードとして「遮る」を掲げた。従来、ドアは「開ける・閉める」に軸足を置いて開発してきたが、「遮る」を中心に考えることで、開発チームの意識や視点が、よりクルマ全体へ、また、動的性能を考えられるようになったことが大きな成長であった。

多くの新しい試みにより、さまざまな領域で本当に多くの困難に直面したが、それらを購買・物流・工場・品証・取引先様に至る全ての関係者の共創によって乗り越えることができた。その努力の結晶が本当に素晴らしい商品となったことは非常に感慨深い。今後も「飽くなき挑戦」の志を忘れず、「走る歓び」を体現したクルマ造りに取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 岡本 哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発、マツダ技報, No.35, pp.21-25 (2018)
- (2) 清水 勝矢ほか：新型CX-9の静粛性開発について、マツダ技報, No.33, pp.33-38 (2016)
- (3) 永本 光一ほか：新型CX-5の静粛性開発について、マツダ技報, No.34, pp.20-24 (2017)
- (4) 伊藤 肇ほか：新型MAZDA3の静粛性開発について、マツダ技報, No.36, pp.96-101 (2019)

■ 著 者 ■



高谷 洋隆



高橋 信之



雪田 恭兵



黒木 大史



松並 裕美子