

特集：マツダビアンテ

17

マツダビアンテの振動・騒音性能開発 Noise and Vibration Development of Mazda Biante

伊藤 肇^{*1} 幅野 浩司^{*2} 住田 英司^{*3}
Hajime Ito Kouji Habano Eiji Sumida
高野 毅^{*4} 鎌田 浩樹^{*5} 津村 信一^{*6}
Takeshi Takano Hiroki Kamada Shinichi Tsumura

要約

ビアンテの開発では、国内の中型トールタイプミニバンのカテゴリへの導入に向けて、競合車を凌駕する優れた振動、車内騒音を実現した。同時に開発工数・対策コストをミニマム化するため、特に開発の上流工程（目標設定、目標のカスケード、図面・CAE解析による検証）を充実させるシナリオ検証型開発に注力した。

パワートレイン騒音性能の開発では、ベース車両からの室内形状変更による性能変化をCAE解析で予測し性能目標の実現を図った。ロードノイズ性能の開発では、アンダーボデーの改善点をベース車両のTPA（入力点寄与度解析手法）等で絞り込み、CAE解析を最大限に活用し性能目標達成の実現を図った。低周波振動騒音性能の開発は、アッパーボデーの各パネルの共振特性目標の分散を行い性能目標の実現を図った。遮音性能の開発では、車両前部カットボデーでのユニット評価などでコストを低減しつつ性能目標の実現を図る一方、Hybrid SEA（Statistical Energy Analysis：統計的エネルギー解析）を活用したシナリオ検証型開発への移行トライアルを実施した。

Summary

Through the development of Biante, a superior performance was achieved in terms of noise and vibration (hereinafter referred to as NV) among competitor vehicles in the category of Japanese domestic tall type mini-van. Moreover, in order to minimize development man-hours and costs of actions, we applied so called "Scenario Verification Style Development" to enhance the upfront development stages (i.e. target setting, target cascading, and predictive analysis and verification).

For the development of powertrain NV performance, we applied CAE analysis to predict the performance change caused by interior volume and shape modifications from a base model vehicle, aiming to achieve the performance target. For the development of road noise performance, we applied TPA (Transfer Path Analysis) to clarify the weak point of the underbody and leveraged CAE analysis to the fullest, aiming to achieve the performance target. For the development of low-frequency NV performance, we carefully conducted the modal alignment of upper body panels, aiming to achieve the performance target. For the development of sound insulation performance, we applied Hybrid SEA (Statistical Energy Analysis) as a trial case of "Scenario Verification Style Development", while performing a unit-level evaluation of the front cut body aiming to both cut costs and to achieve the performance target.

1. はじめに

ビアンテでは、乗員の快適性を実現するため、振動騒音性能においては以下の項目に重点を置き、開発を行った。

- (1) パワートレイン騒音性能：日常の走行シーンで、ストレスなく会話ができるエンジン音を実現する。
- (2) ロードノイズ性能：定常走行において、クラストップ

レベルの静粛性を実現する。

- (3) 低周波振動騒音性能：クラス最大の室内空間容量と多彩なシートアレンジ機構を実現しつつ、クラストップレベルの低周波NVH性能を実現する。
- (4) 遮音性能：パワートレイン騒音やロードノイズ性能目標を最少の材料、コストで達成させる。

*1~6 NVH性能・CAE技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

本稿では各性能に対し、性能の狙い、達成施策、達成手段について紹介する。

2. パワートレイン騒音性能開発

2.1 開発の狙い

国内向け中型トールタイプミニバンの特徴は、ファミリーユーザが多く、その使用シーンで重視されるNVH性能は官能的な加速サウンドよりも会話を楽しめる静粛性である。日常の走り出しで力強い加速を發揮するエンジンと、Zoom-Zoomを体現する剛性の高いボデー、クラス最大の室内空間を組み合わせたときに、こもり音やエンジン音でユーザに不快感を与えないことを目指した。

2.2 実現手段

試作車を作らずに性能を達成するためには、机上予測技術の精度をどれだけ上げることができかがポイントとなる。ビアンテでは、ベース車両からの車体音響感度の室内空間による差異やベース車両の実走振動特性を基にしたCAE解析を用い、図面の仕様を決定した。

(1) 室内空間の形状変化に伴う低速こもり音の変化予測

ビアンテの特徴はその大きな室内空間であり、こもり音を支配する車体音響感度はその室内空間の形状の影響を大きく受ける。Fig.1がベース車両の車内音の寄与度分析であり、エンジン回転2,100~3,100rpm領域の車内音2次成分がほぼ排気音で占められている。ベース車両からの形状変化により、ビアンテはテールパイプからドライバ席までの車体音響感度がベース車両とは大きく異なるということが予想され、この領域のこもり音を予測し改善することが低回転域の静粛感確保のためには必須であった。

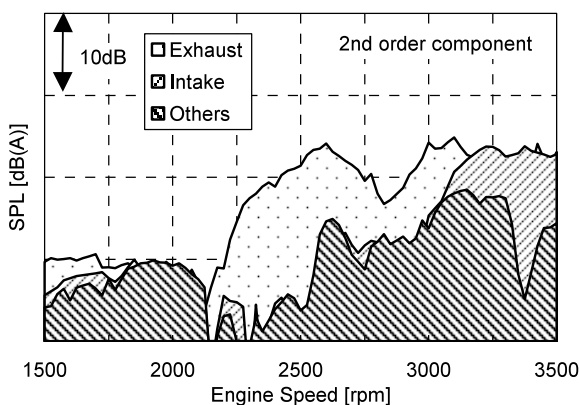


Fig.1 Contribution Analysis of Interior Noise at Driver's Seat

室内空間の違いによって発進時こもり音がどの程度変化するかを予測するために、同等の室内空間をもつ車両のテールパイプから運転席耳元位置までの車体音響感度を計測し、更に室内空間の違いによるベース車両からの車体音響感度の変化をCAE解析で予測し、形状の変化は感度に対して好ましい影響を及ぼすことが分かった (Fig.2)。実際の

車両でも低回転域のラウドネスが改善されることを検証し、ビアンテの静かな走り出しを実現した。

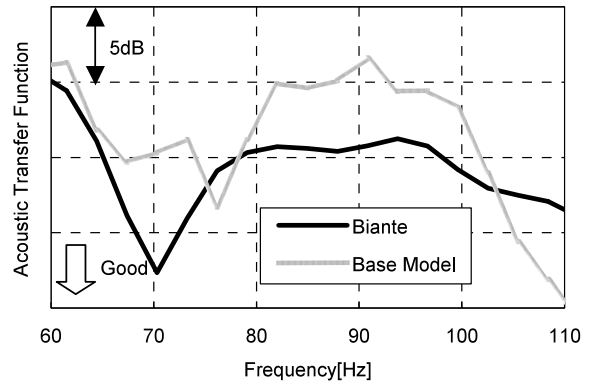


Fig.2 Acoustic Transfer Function from Exhaust Tail to Driver's Ear of Base Model and Tall Wagon

(2) CAEによる中高速こもり音予測

振動入力为主要因である中高速こもり音に関してはベース車両の振動を元に骨格系やパネルの形状変化の影響をCAE解析で予測した。まずベース車両で主要なパネルの振動特性や実走状態の加速度、放射音を計測し、TPA (伝達経路解析) を実施した。これによって得られた入力に対して、CAE解析により車体音響感度を掛け合わせ、合成することで車内音を推定した。実際に、量産直前の確認車両で車内音を計測し精度の検証を行った。これにより、こもり音の試作車レスの開発が狙いどおりに完了したことを確認した (Fig.3)。

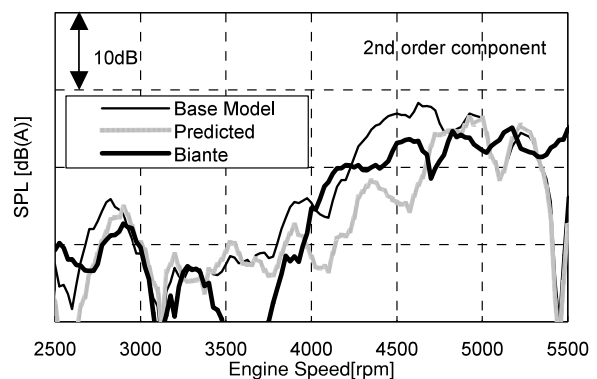


Fig.3 Booming Noise Prediction by CAE

2.3 総括 - パワートレイン騒音性能開発

従来はボデーの変更に伴うエンジン音やこもり音の変化を精度良く予測することが困難であり、効率的な騒音性能開発の妨げとなっていた。しかし、今回、ビアンテの開発を通じて、試作車レスでも騒音性能を精度良く予測し、完成車で体現することができた。これにより工数やコストの削減だけでなく、品質確認も確実にできるため、より品質の安定した商品を作り出すことができるようになった。

3. ロードノイズ性能開発

3.1 開発の狙い

ピアンテでは、中型トルクタイプミニバンのクラス上位のロードNVH性能を目指し、車室内でストレスなく会話が弾むようなロードノイズ性能を達成した。中でも、粗粒路ロードノイズやドラミングは、乗員へ不快感を与え、車室内での会話の妨げとなりえるため、特に注力して開発を進めた。具体的な目標値をFig.4およびFig.5に示す。

また、開発プロセス革新の先駆者として短期開発、コスト最適化、シナリオ検証型開発、CAEの活用と実車コリレーション、徹底した図面検証を行い量産図面出図以降の設計変更ゼロを目指した。

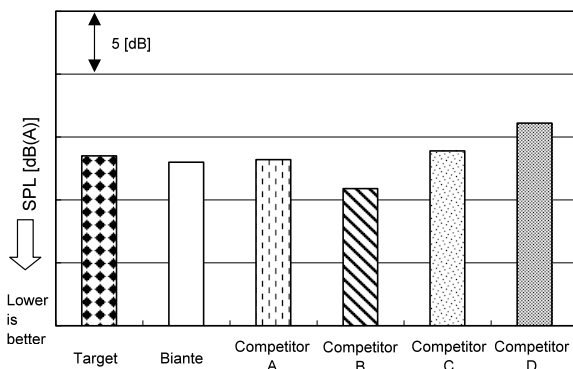


Fig.4 Coarse Road Noise

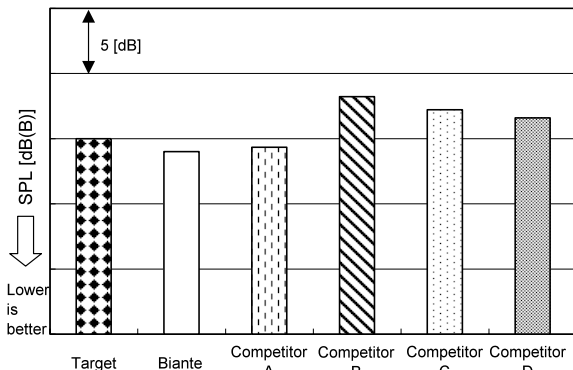


Fig.5 Drumming

3.2 ボデー最適構造実現へのプロセス革新

量産図面出図以降の設計変更ゼロを達成するには、先行段階の充実が不可欠である。ピアンテでは開発初期段階でCAE解析を活用し、実車検証可能な項目は先行検討車で検証した。その結果をCAE予測と照合し、予実差検証を繰り返し行うことで要求性能を図面へ反映した。

(1) アンダーボデー開発

ベース車両の改善点と変更点（ホイールベース延長等）を中心にCAE解析やTPA（伝達経路解析）で改善部位を絞り込み、予実差の検証を実施した。Fig.6はベース車両の課題であったフロントサスペンションクロスメンバ取り付け部構造についての予実差検証結果である。加振点イナータンス（以下PIと略）の傾向は一致している。

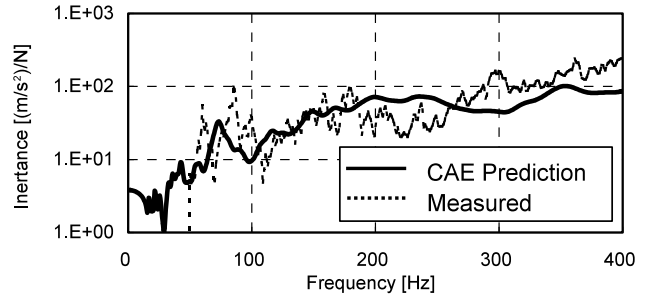


Fig.6 Verification of Difference between Predicted and Measured Value

(2) アッパーボデー開発

実車で計測したPIとCAE解析のコリレーションを確実に取り、各部共振周波数の分散化を狙い、共振周波数マップを活用してCAE解析を実施した上で図面仕様を決定した。Fig.7に共振周波数マップの一例を示す。

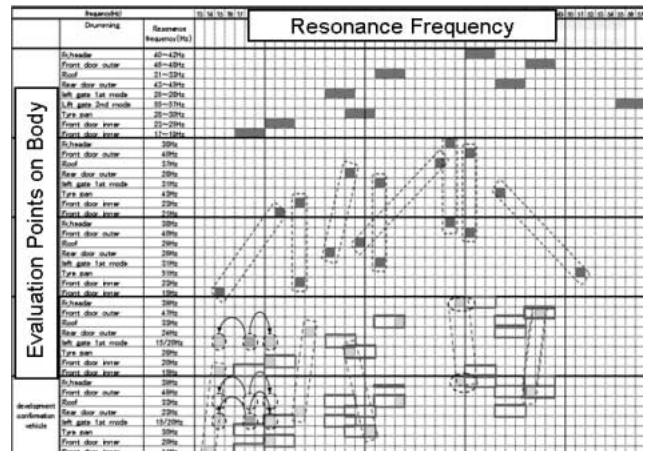


Fig.7 Resonance Frequency Map

(3) 車室内空洞共鳴領域予測

ベース車両から大きく変化し、空洞共鳴に大きく影響する室内の形状や広さについてもCAE解析を活用し先行検討車とのコリレーションを取り、精度を高めつつ構造提案を行った。Fig.8にCAEモデルで空洞共鳴領域について解析した例を示す。

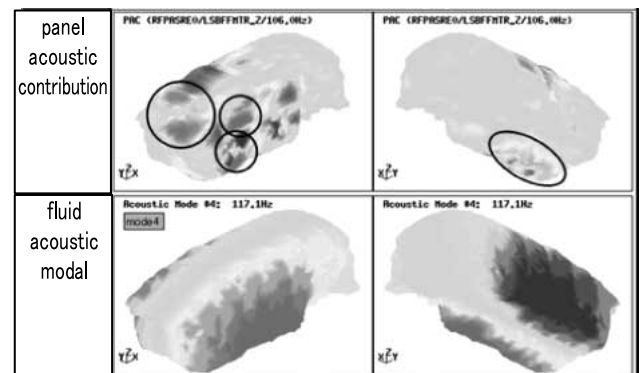


Fig.8 Acoustic Cavity Resonance Prediction

(4) 特性目標の検証

量産直前の確認車両完成前段階においてホワイトボデー、トリムボデーでのPI計測を行い、車両完成の前段階で車体各部の振動特性の検証を行った。Fig.9は検証したユニット特性一覧表(一部抜粋)である。

また、Fig.10にユニット目標を設定し、相関を取ったPI測定点の例(アッパーボデーのみ掲載。図中の丸印)を示す。

| Unit Characteristic | | Advanced vehicle | | | | CAE analysis | | | | development confirmation vehicle | | | |
|---------------------|---------------------|------------------|----|------------|----|--------------|----|-------|----|----------------------------------|----|-------|--|
| | | Drummed | | White body | | White body | | Parts | | White body | | Parts | |
| Item | Target | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | PI | |
| Door panel | RH front door | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | LH front door | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | RH rear door | CAE model | G | Y | | | | | | | | | |
| | LH rear door | CAE model | G | Y | | | | | | | | | |
| Class | Front center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| Roof panel | Front header rear | CAE model | Y | Y | | | | | | | | | |
| | #2 rear | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| | #3 rear | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| | #4 rear | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| | #5 rear | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | #6 rear | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| Roof rear | Front header center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | #1 center | CAE model | Y | Y | | | | | | | | | |
| | #2 center | CAE model | Y | Y | | | | | | | | | |
| | #3 center | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| | #4 center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | #5 center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| | #6 center | CAE model | Y | G | | | | | | | | | |
| | Rear header | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| LH gate | center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |
| Trunk pan | center | CAE model | G | G | | | | | | | | | |

Fig.9 Unit Characteristic Targets

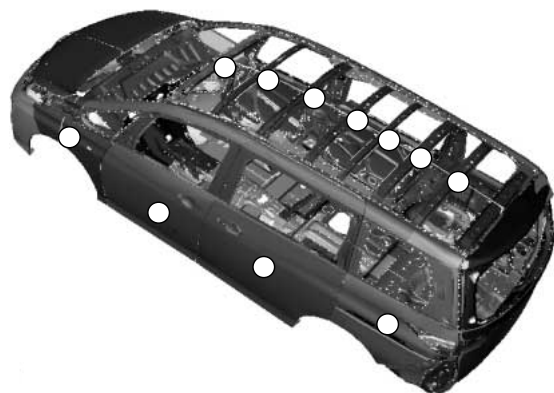


Fig.10 PI Measurement Points

3.3 総括 - ロードノイズ性能開発

ビアンテのロードノイズ性能開発においては、実験とのコリレーションを確実に取りつつCAE解析によるシミュレーションを最大限に活用し予測精度を高め図面化、更に変更点をCAE解析で予測することを繰り返し実施した。その結果、量産図面出図以降の設計変更ゼロを達成することができた。今後のプロジェクトにおいても、ビアンテの開発プロセスを更に進化させ開発のフロントローディング化を推進する。

4. 遮音性能開発

遮音性能に関して、量産図面出図以降の設計変更をゼロにするため、徹底した図面検証や、車両前部カットボデーを活用し、各部位ごと目標特性を確認するなどの活動を行ってきた。ただ、これらの活動は各部位での部分的な遮音性能を確認するための活動であり、車両トータルでの遮音性能の目標達成度を確認するものではない。今回は遮音性

能の最適化とシナリオ検証型開発を目指し、今後の開発ツールの柱にすべく、実験と解析を組み合わせたSEAを用いた遮音解析のトライアルを行った。

(1) SEAモデル作成について

まず現行ベース車両とビアンテのSEAモデルの作成を行う。目標は耳位置での音圧で設定しているが、その音圧を予測するためには、車内&車外の各音圧を実測する必要がある。そのため、CADデータを元にサブシステムを作成し、車室内、車体構造内部の空洞、車室外を約50ブロックに分け計測ポイントを設定した(計測ポイントはFig.11, 12)。

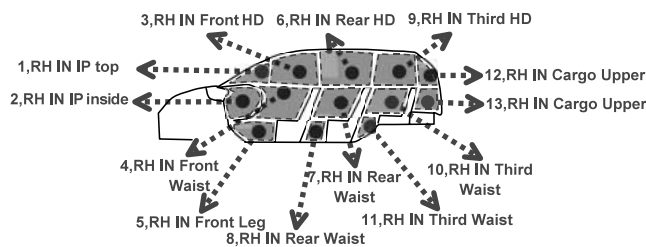


Fig.11 Subsystem (Vehicle Interior)

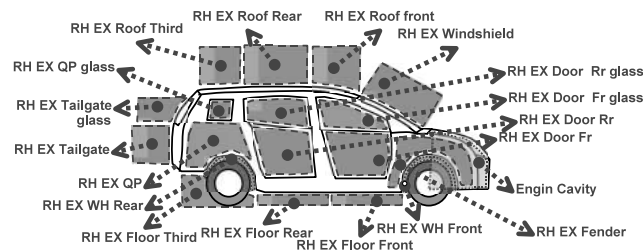


Fig.12 Subsystem (Vehicle Exterior)

このサブシステムに、点音源をエンジンルーム、タイヤに設置して計測した音圧の実測値を入力する(点音源の設置位置はFig.13)。

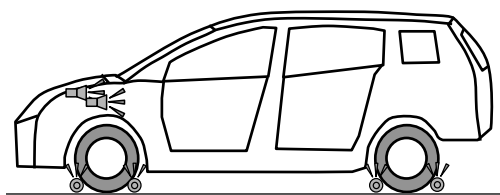


Fig.13 Noise Source Position

このモデルに吸音材の単品特性データおよびダンピング特性などのパラメータを入力し、モデルを作成することができた。

(2) SEA計算結果について

前述のモデルを用い、エンジン放射音に対する車内音の空気伝播成分の予測を行った。現行ベース車両とビアンテの解析結果 (Fig.14) および実車計測結果 (Fig.15) は以下の通り。

どちらも音圧レベルの差は2,500Hz付近で反転する同傾向を示していることを確認し、SEA上で性能検証を行うことができた。2,500Hz以上の目標未達分については、Aピラ一周辺の遮音性能を強化することで、目標達成させている。

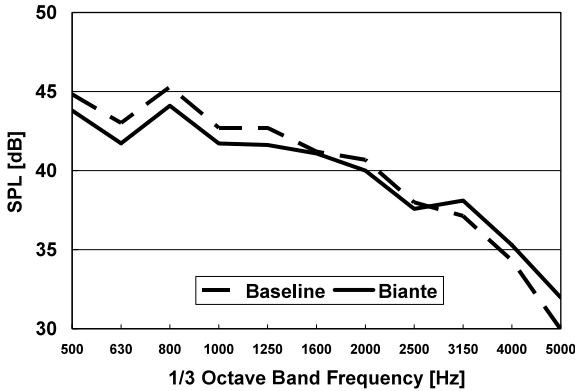


Fig.14 Prediction Result by Using SEA

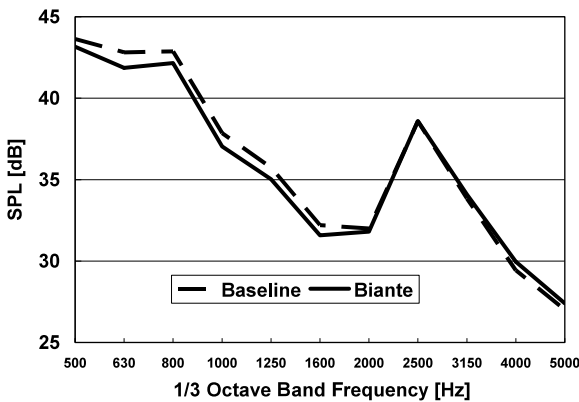


Fig.15 Measurement Result

ピアンテの遮音性能開発においては、SEAを用いながら開発を行うことで、図面段階で性能を予測できる目処がたった。今後、本格的に車両開発に適用していくために、更にSEA技術を熟成させ、活用していく予定である。

5. 低周波振動騒音性能開発

5.1 開発の狙い

ピアンテの開発目標は、特長であるクラス最大の室内空間容量と多彩なシートアレンジ機構を実現しつつ、クラストップレベルの低周波NVH性能との両立を図ることとした。

具体的には、下記2点を重点開発項目とした。

- (1) 大開口面積を持つリフトゲート採用による、アイドル時のこもり音の悪化防止
- (2) ロングスライド機構を持つシートレールの採用に伴う、シートレールの剛性低下による、アイドル時の2列目シート振動の悪化防止

また、ピアンテの開発においては、開発の上流工程（目標設定、目標のカスケード、図面・CAEによる検証）に注力し、開発工数・コストのミニマム化に取り組んだ。

5.2 実現手段

(1) 大開口部を持つリフトゲートの共振周波数コントロール
リフトゲート等のパネル・蓋物系は、アイドル回転域に共振周波数が存在すると、こもり音の発音部位となりやすい。また、開発後期に問題が発覚した場合、ダイナミックダンパ等のデバイスを用いて対応せざるを得なくなり、コストアップの要因となる。したがって、設計段階でアイドル設定回転域を外して共振周波数を設定することが必要である。一方、ピアンテのリフトゲートはベース車両に比べて、大きな開口面積を持つため共振周波数が低くなりやすく、アイドル設定回転域を十分に外して共振周波数を設定することが困難であった。このことから、Dレンジ、エアコン-OFF時の設定回転数域と、Dレンジ、エアコン-ON時の設定回転域の双方にかからない領域を目標周波数とした (Fig.16)。

| Engine Speed [rpm] | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 |
|-------------------------|-----------|------|------|----------|------|------|------|------|
| 2nd Order [Hz] | 18.3 | 20.0 | 21.7 | 23.3 | 25.0 | 26.7 | 28.3 | 30.0 |
| Idle speed at "D" range | ← A/C Off | | | ← A/C On | | | | |
| Biante | | | ● | | | | | |
| Baseline | | | | | | | | ● |

Fig.16 Lift Gate Resonance Frequency Map

目標周波数を実現する構造の検討にはCAE解析によるシミュレーションを活用した。リフトゲート振動特性のCAE予測結果と実車計測結果をFig.17に示す。

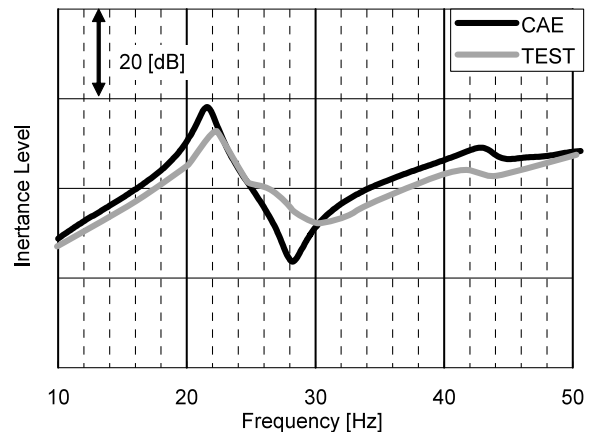


Fig.17 Lift Gate Inertance

CAEによる早期の構造変更検討の結果、狙い通りのリフトゲート振動特性を実現することができた。実車アイドルこもり音のレベルをFig.18に示す。前記、リフトゲート共振周波数のコントロールに加えて、ボデー振動特性の最適化や、サスペンション入力の低減等によるロバスト性の確保を行うことで、ダイナミックダンパ等のデバイスを用いることなく、良好なアイドルこもり音性能を実現した。

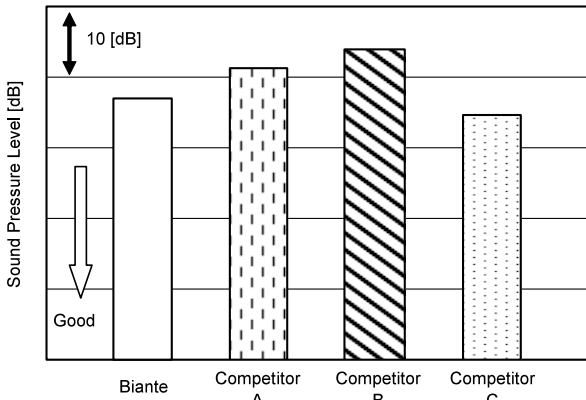


Fig.18 Idle Booming Noise Level

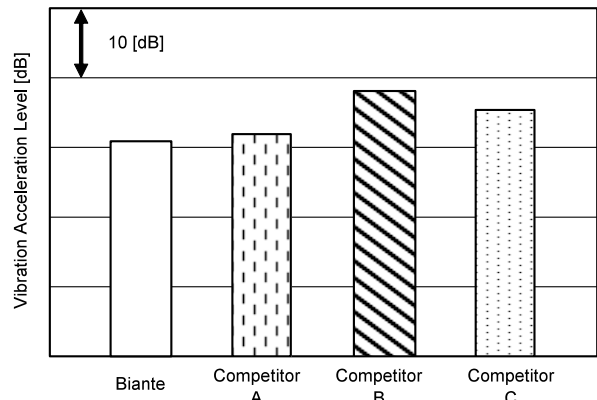


Fig.20 Idle Vibration Level at 2nd Seat

(2) ロングスライド機構を持つ2列目シートのアイドル振動
 ビアンテでは、2列目シートの足元に前後長863mmの
 広々としたスペースを確保できる「リビングモード」をは
 じめとする、多彩なシートアレンジの実現のため、2列目
 シートにロングスライド機構を持つシートレールを採用し
 ている (Fig.19)。

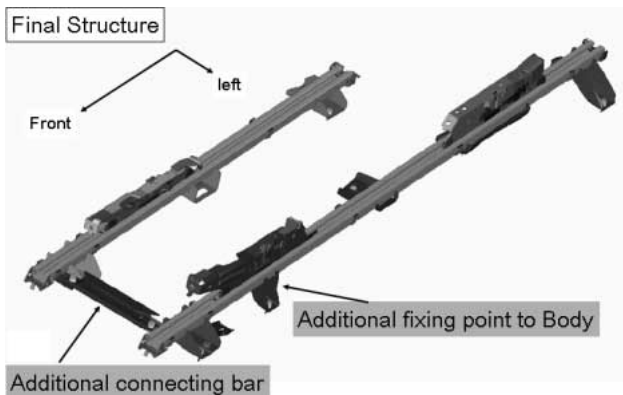


Fig.19 Long Slider Rail at 2nd Row Seat Attachment

このため、シートレールの剛性が低下し、アイドル時の
 シート振動が悪化する懸念があった。確認のため、ロング
 スライドレールの試作車両を用いて、課題の抽出を行った
 結果、シートレール左右方向の倒れ剛性の不足によるアイ
 ドル時のシート振動悪化が課題であることが分かったため
 目標剛性を設定した。次に、目標剛性実現のための構造を
 CAE解析を用いて検討し、初期構造に対して、ポデーへの
 締結点の追加、およびインナレール/アウトレール間のコ
 ネクトバーを追加した構造 (Fig.19) を提案し、最終図面
 に織り込んだ。アイドル時の2列目シート振動の評価結果
 をFig.20に示す。シートレールに加えて、車体骨格の振動
 特性の改善を合わせて行うことで、良好なアイドル振動性
 能を実現することができた。

5.3 総括 - 低周波振動騒音性能開発

ビアンテの低周波NVH性能開発においては、CAE解析
 によるシミュレーションを最大限に活用することで、量産
 図面出図以降の設計変更を最小限に抑えることに成功し
 た。今後の開発プロジェクトにおいても、ビアンテの開発
 プロセスを更に進化させ、開発のフロントローディング化
 を推進していく。

6. おわりに

以上述べたように、ビアンテの振動騒音性能開発におい
 て、目標とした快適性の実現と開発工数・コストのミニマ
 ム化を両立させるために 様々な新しい取り組みを行った。
 これにより、長距離ドライブでも車内での会話が弾み安定
 して快適に走れる商品として具現化することができた。

著者



伊藤 肇



幅野浩司



住田英司



高野 毅



鎌田浩樹



津村信一