

パネル振動位相コントロールによる SUV車室内低周波音圧の低減

Study of Method to Reduce Low-frequency Noise by Controlling Panel Vibration Phase

近 藤 隆*
Takashi KONDO

須 藤 晶*
Akira SUTO

安 田 紘 之*
Hiroyuki YASUDA

要 旨

低速こもり音やドラミングなどの低周波音圧に対して、複数のパネル振動の位相に着目し音圧を低減する手法を検討した。低周波騒音の事象はキャビン形状で決まる音響モードの影響が大きい。そこで低周波数領域において車室内音圧に影響のあるパネル位相の関係をパネル共振周波数の配置によって実現し、音圧を低減する方法を考案した。

また、低周波数領域におけるBEM解析技術を構築し、測定結果から得られた境界条件によって車室内音圧の予測ができ、各パネルの寄与を明確にした。これらの結果から、完成車において複数のパネル共振周波数を変更する構造変更をおこない、音圧を打ち消す位相の実現することで10dBの音圧低減効果が得られた。

ABSTRACT

A method of reducing the sound pressure of low frequency noises such as booming and drumming noise was devised by focusing on the phase relation between multiple panel vibrations. Low frequency noise is affected by the acoustic modes, which are determined by the shape and the size of the cabin. Accordingly, an advantageous panel phase relation was clarified for the sound pressure inside the cabin in the low frequency region, and a method of realizing this phase relation by means of the distribution of the panel resonance frequencies was invented.

Also, technology for performing BEM analysis in the low frequency region was established. The sound pressure in the cabin was predicted according to the boundary conditions obtained from the measurement results, and the contribution of each panel was clarified. From these results, the multiple panel resonant frequencies of a completed vehicle were adjusted, and the necessary phase relation for canceling the sound pressure was realized, thus the sound pressure was reduced.

1. まえがき

近年、環境性能に対する要求の高まりから、直噴エンジンやディーゼルエンジンの採用、燃費改善のためのATロックアップ領域の拡大など、エンジンやサスペンションの振動を増加させる要素が多くなってきている。さらには軽量化への要求も高く、振動騒音の性能と相反することが多く、低周波振動騒音の開発は、より難度が増している。

ワゴンやミニバンでは、キャビンの形状と大きさで決まる車室内の音響1次モード周波数が、フロントサスペンションの共振周波数に近いために、低速こもり音やドラミング(低周波ロードノイズ)などの低周波騒音が問題となりやすく、その対策に多くの工数をかけている。近年、この領域における音響と構造の連成問題に取り組む研究^{(1), (2)}がおこなわれているが、対策手法はボデーの骨格構造の補強や

マスダンパ、ダイナミックダンパ等の付加になることが多く、パネルに注目した対策例もあるが、ひとつのパネルのみを対策することがほとんどで⁽³⁾、複数のパネルの関係を考慮した事例はあまりない。

本稿では特にワゴンやミニバンを対象とし、音響1次モードが支配的な周波数領域において、フロントガラス、ルーフ、テールゲートなどのキャビンを構成する複数のパネル共振周波数を適切に配置することで、車室内音を低減する手法について述べる。また、本手法の有効性を検証するために、境界要素法(Boundary Element Method : BEM)を用いた解析手法⁽⁴⁾を低速こもり音、ドラミングに適用した事例を紹介する。

本手法を用い、開発の初期段階において各パネルの共振周波数を適切に設定することにより、早期に仕様決定が可能となった。

*四輪開発センター

2. パネル位相コントロールによる音圧低減手法

2.1. 音の発生メカニズム

低周波騒音の発生メカニズムについて考える。振動源はエンジンやサスペンションであり、その振動がエンジンマウントやサスペンションブッシュなどを經由してボデーに伝わり、キャビン構成するフロントガラス、ルーフ、テールゲートなどのパネル振動を励起し、その結果として車室内に音が発生する。このとき、車室内に存在する音響モードが音圧に影響を及ぼすが、音響モードの周波数はキャビンの形状と大きさによって決まり、ワゴンやミニバンにおける音響1次モードの周波数はおおむね 40-50Hz になる。このモードではキャビンの前部と後部が腹、中央部が節となる Fig. 1 に示すような音圧分布となる。

2.2. 従来手法の課題

従来低周波騒音の低減手法としては寄与の高いパネルに着目し、その振動レベルを低減するためにパネル応答特性を変化させる構造変更が多かった。この場合、構造変更による振動レベルの低減には限界があり、次に寄与の高いパネル振動を低減するという対策仕様決定までに時間のかかる開発手法であった。限られた開発期間の中で早期に仕様決定するために、複数のパネルの特性に着目し、振動レベルの低減のみに頼らない開発手法が必要となる。

2.3. 複数パネルの位相に着目した音圧低減手法

本研究では音響1次モードの特徴を考慮し、二つ以上のパネルの位相に着目し、音圧を低減する位相の関係を共振周波数の配置によって実現する方法を考案した。

例として、キャビンの前部に配されたフロントガラスと後部に配されたテールゲートの二つのパネルのみから音圧が発生している場合を考える。4気筒車のエンジン2次振動によるアイドル騒音領域(20-25Hz)のように、音響1次モードの影響が少ない低周波領域では、車室内空間の体積変化が大きくなるようなパネル位相の関係で音圧が増加する。一方、音響1次モードが支配的な領域では、体積変化を大きくするような位相の関係であればFig. 2に示すように、音響モードの特徴からキャビンの前側と後側が逆位相の音圧分布を示すため、フロントガラスから発生した音をテールゲートから発生した音で打ち消すことになり、音圧は減少する。つまりキャビン前方部に配置されるパネルと後方

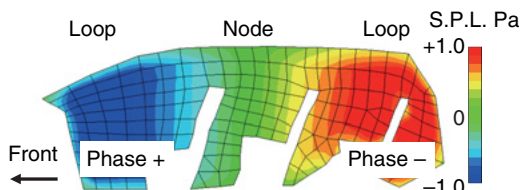


Fig. 1 Sound pressure distribution of 1st acoustic mode

部に配置されるパネルが室内側に対して同位相で振動する構造が求められる。

以上のようなパネル位相コントロールによる音圧低減の考え方をういて、具体的な検討をおこなった。

2.4. 共振周波数によるパネル位相コントロール

各パネルの位相はその共振周波数を境に位相特性が反転する1自由度振動モデルの基本的特徴を利用し、車室内音圧に寄与の高いパネルの共振周波数を最適に配置することで、音圧を低減させるパネルの位相の実現することが可能と考えた。

完成車の加振実験を実施し、フロントガラス中央部とフロントピラー部の振動位相特性を比較した結果、Fig. 3に示すようにフロントガラスの1次モードの共振周波数を境に位相が反転していることを確認した。これは1自由度共振モデルが示す基本的な特徴である。この結果は完成車における各パネルの位相特性がそれらの共振周波数の変更により決定できることを示している。

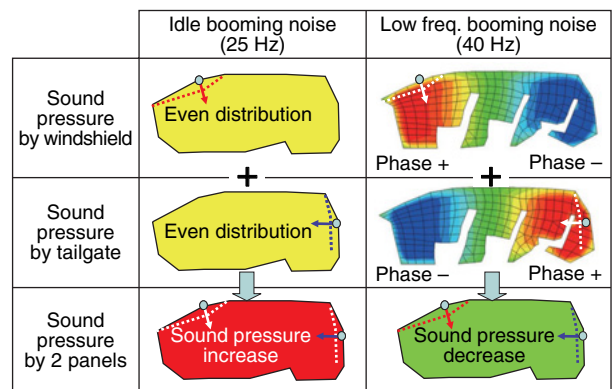


Fig. 2 Mechanism of noise generation

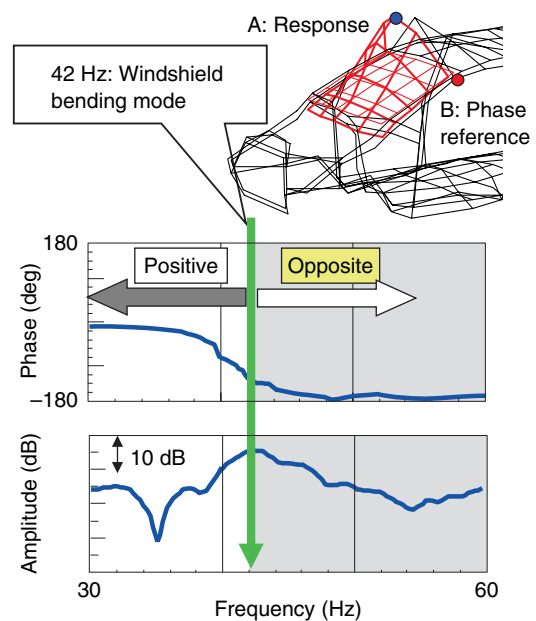


Fig. 3 Transfer function from front pillar to center of windshield

2.5. パネル位相の組み合わせ

音響1次モードを打ち消す位相の関係を実現させる方法を二つのパネルの共振特性から考える。フロントガラス共振周波数を音響モードより低くし、テールゲート共振周波数をそれより高く設定することで音響モード領域における二つのパネルの位相がキャビン室内側に対して同位相となり、音圧の低減が可能となる。共振周波数と位相を Fig. 4 に示す。

各パネル位相の関係は、それぞれの共振周波数の関係から定まり、その位相によって音を増長したり打ち消したりすることがわかった。完成車においては、音響1次モードに近い周波数において音圧が高いことが多いため、本研究では完成車の音響1次モードの周波数近傍において、パネルの位相をコントロールし、車室内音圧を低減することを目的とした。

パネル位相の関係は、個々のパネルの共振周波数を音響1次モードの周波数より高く設定するか、低く設定するかで決まる。今回の試験に供した車両の室内音圧に対して寄与の高いパネルは、寄与の高い順にフロントガラス、ルーフ、リヤフロア、テールゲートの4パネルであるから、それぞれのパネルの共振周波数を音響1次モード周波数よりも高くするか低くするかで組み合わせを検討した。テールゲートに関しては、構造上音響1次モード周波数よりも共振周波数を高く設定することが困難であるため、低く配置せざるを得ない。その結果、Table 1 に示すように A-H まで8通りの共振周波数の組み合わせが考えられる。また、フロントガラスを基準にとると、音を増長する位相であるか、打ち消す位相であるかが実験結果から得られるので、それを図中に示した。網かけ表示になっている配置は、フロントガラスから発生する音を増長する位相になる。よって、網かけ表示が少ない組み合わせが望ましいことから、CとFの組み合わせが良好であることがわかる。

以上のようなパネル位相コントロールによる音圧低減の考え方をういて具体的な検討をおこなった。

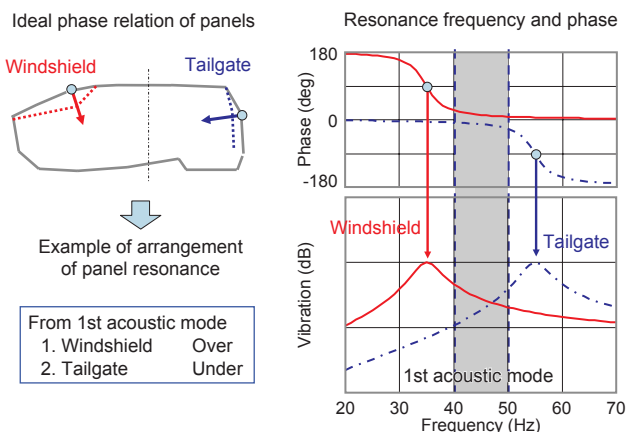


Fig. 4 Ideal arrangement of panel resonance

Table 1 Combination of panel resonance frequency

	Windshield	Roof	Rear floor	Tailgate	Phase condition
A	↑	↑	↑	↓	Even
B	↑	↑	↓	↓	Poor
C	↑	↓	↑	↓	Excellent
D	↑	↓	↓	↓	Good
E	↓	↑	↑	↓	Good
F	↓	↑	↓	↓	Excellent
G	↓	↓	↑	↓	Poor
H	↓	↓	↓	↓	Even

Unsuitable phase condition

↑ Resonance frequency : over 1st acoustic mode

↓ Resonance frequency : under 1st acoustic mode

3. BEM を用いた解析手法

3.1. BEM による車室内音圧予測

車室内音圧は、室内の各パネル振動からそれぞれ発生する音の重ね合わせで表現される。発生する車室内音圧に対し、どのパネルが重要であるかを知るためには、パネル寄与を明確にする手法が必要となる。そこでBEMを用い、キャビン空間をモデル化してパネル振動から音圧を計算する解析手法を導入した。

まず、Fig. 5 に示すようなシートを含むキャビンの閉空間をモデル化した。

境界面が剛壁の状態では、計算による音響モードの周波数が完成車で測定した結果より高く、さらにダンピングが低いために鋭いピークが現れてしまい、車室内音圧の計算結果と実測値の差異が大きく精度が低い。これは内装材の影響により完成車状態では境界壁面の音響インピーダンスが計算モデルよりも低いことが理由として考えられる。そこで、数種類の内装材の単体特性テストを実施し、得られた平均的な値を音響インピーダンスが高いガラス部分を除いた境界壁面に設定した。この手法により、計算値と実測値の差異は Fig. 6 に示すように±3dB 以内となった。

3.2. パネル寄与解析

本手法によりパネル振動速度からそのパネルが発生する音圧成分を計算することが可能であり、各パネルの音圧成分の大きさと位相を比較することで、パネル寄与解析が可

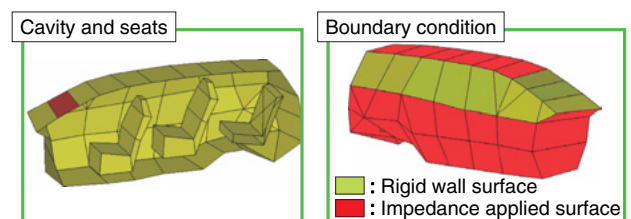


Fig. 5 BEM cavity model

能となる。二つのパネルによるパネル寄与解析結果を例に音圧を低減させる方法を考える。

フロントガラスの成分とルーフの成分が車室内音圧に対して寄与が大きい場合、フロントガラスとルーフの二つの音圧成分が互いに打ち消すような位相の関係にあれば、車室内音圧を小さくすることが可能であることがわかる。Fig. 7 ではフロントガラス成分の位相を 90 度遅らせた例を示す。ルーフ成分との位相差がほぼ 180 度になり、合成ベクトルとしては小さくなる。つまり、この状態が実現できれば、車室内音圧の低減が可能と考えられる。

3.3. ドラミング(低周波ロードノイズ)への適用

3.3.1. パネル位相の把握に関する課題

低速こもり音はエンジン起振力が入力源となる事象であり、エンジンパルスを測定基準とすることで複数のパネルの位相の関係を把握することは容易である。一方、本手法をドラミング(低周波ロードノイズ)に適用することを考えると、路面からの振動入力が4輪のタイヤを介してボデーに伝わるため、無相関な複数の入力があり、位相の関係を把握するためには信号処理に工夫が必要である。

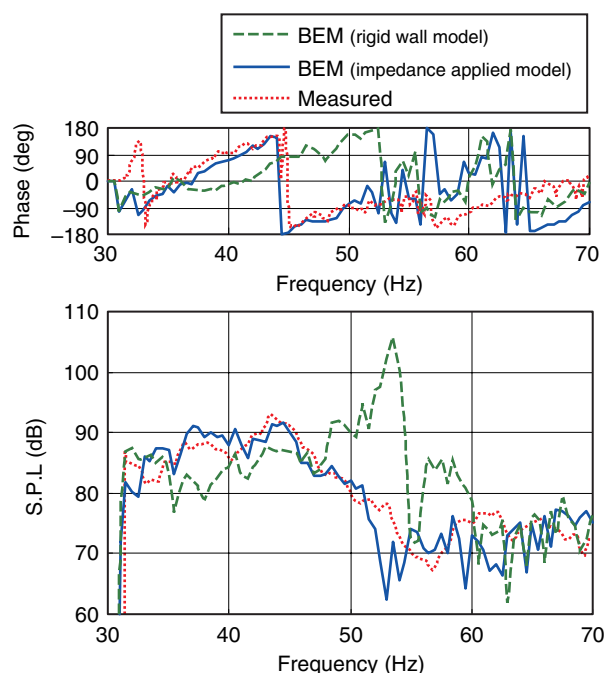


Fig. 6 Calculated S.P.L from actual car vibration

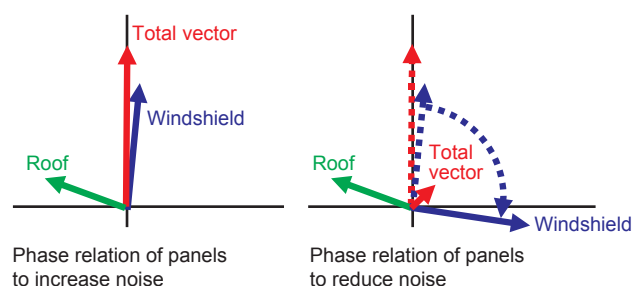


Fig. 7 Panel contribution analysis

そこで、複数の入力が存在する事象に対して、寄与の高い基準を抽出し、その位相の関係を把握する次に示すような相関成分抽出法を用いた。

3.3.2. 相関成分抽出法

ドラミングの入力はサスペンション振動であることから、実稼動時の音圧およびパネル振動を各輪のサスペンション振動との相関性の高い成分に分解することで、各パネルの位相の関係を把握した。

k 個の独立した振動入力がサスペンションから伝わると考える。測定された車室内音圧を P とすると、 P は式(1)に示すように k 個の成分の合計で表される。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_k \quad (1)$$

このように、室内音圧を各入力によって発生する成分に分解することで、各パネルの位相の関係を検討する。このとき、入力 j に起因する音圧成分 P_j は入力 j と室内音圧のコヒーレンス γ_j の平方根をかけることで式(2)のように得られる。

$$|P_j| = |P| \cdot \sqrt{\gamma_j} \quad (2)$$

P_j の位相特性は、入力信号と室内音圧のクロスパワースペクトルで得られる。

m 枚のパネルがあるとし、パネル n の振動に注目すると、入力 j と相関のある成分 V_{nj} はパネル n の振動と入力 j とのコヒーレンス γ_{nj} から式(3)のように得られる。

$$|V_{nj}| = |V_n| \cdot \sqrt{\gamma_{nj}} \quad (3)$$

V_{nj} の位相特性は入力 j とパネル n の振動とのクロスパワースペクトルで得られる。こうして得られた j と相関のある振動入力 V_{nj} を BEM モデルに与えることで式(4)に示すように P_j が算出され、同時に各パネルの寄与を算出することが可能となる。

$$P_j = \sum_m \{ [H_j] \cdot V_{nj} \} \quad (4)$$

H_j : パネル j の音響振動伝達関数

4. 完成車検証結果

4.1. 低速こもり音低減効果

4.1.1. パネル位相コントロールによる音圧低減効果

Table 1 の C と F の組み合わせを実現することを目的として、CAE を用い車体の構造変更検討をおこなった。その結果 C においては、フロントガラスの共振周波数を上げるために多くの重量が必要であることがわかった。対象となる車両の開発においては、重量の制約が大きいので、F の組み合わせが現実的であると判断し完成車による検証をおこなった。この組み合わせではフロントガラスの音圧成分に対して、ルーフとリヤフロア音圧成分が打ち消す位相の関

係となり、テールゲート音圧成分が増長する位相となる。増長させる音圧成分の寄与が小さければ全体としての音圧低減効果は期待できる。

低速こもり音の検証に使用するテスト車両を a とする。車両 a の各パネル共振周波数は、フロントガラスの共振周波数が40Hz、ルーフの共振周波数が43Hzと、音響1次モード周波数である43Hzに近接していた。Fの組み合わせを実現するためフロントガラスとフロアの共振周波数が音響1次モード周波数よりも低く、ルーフ共振周波数が高くなるようCAEにより構造検討をおこない、テスト車両の構造変更を実施した。音響1次モードが支配的である領域は、モードの周波数である43Hzを中心として、その前後に及ぶため、フロントガラスの共振周波数を33Hz、ルーフを60Hz、フロアを36Hzに配置し、音響モードの周波数から十分にパネル共振周波数を遠ざけた。これによりTable 1におけるFの組み合わせが、Fig. 8に示すように実現された。

完成車における構造変更後のフロントガラスとルーフの振動位相を確認した結果、Fig. 9(上段)に示すように音響1次モード支配領域において互いに打ち消す位相の関係(室内側に対して同位相)であることが確認でき、構造変更前後における低速こもり音は対象とした43Hz(エンジン回転数：1300rpm)付近において、10dB以上の大幅な音圧低減効果が得られた。

パネル寄与解析の結果、構造変更前後におけるフロントガラス音圧成分とルーフ音圧成分の関係が増長から打ち消す特性に変化していることが確認された(Fig. 10)。

4.1.2. 従来手法との比較結果

位相コントロールによる効果を比較するため、従来手法との比較をおこなった。従来手法とはパネル振動レベルの低減を目的とした手法であり、ここでは位相の関係が音響モードを増長させる組み合わせとなるTable 1におけるAについて同じ車両aに構造変更をおこない、パネル振動レベル低減のみの対策による音圧低減効果を確認した。

この場合、ルーフ共振特性はFと同じだが、フロントガラス共振を60Hz、リヤフロアを45Hzに変更した(Fig. 11)。

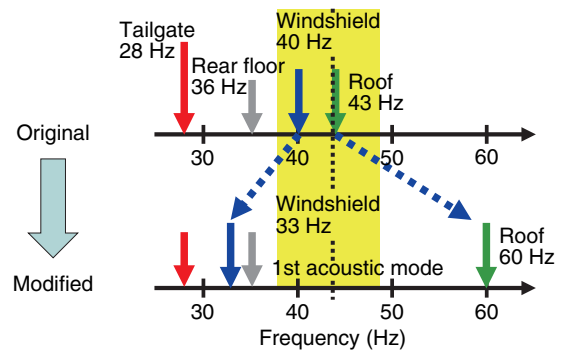


Fig. 8 Modification F of panel resonance

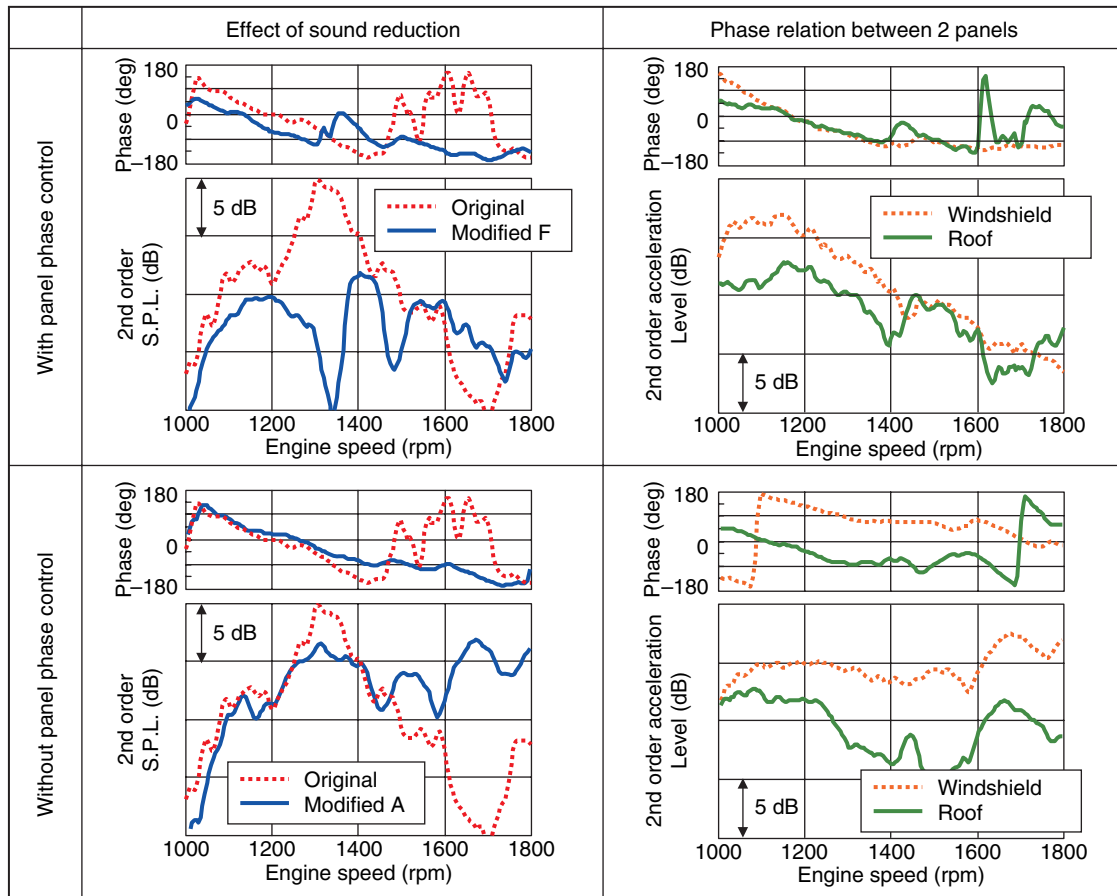


Fig. 9 Result of low frequency booming noise and panel phase relation

パネル支持構造の剛性をあげるにより固有値を高くし、かつ振動レベルをF同等になるよう構造変更をおこなった。低速こもり音の低減効果とフロントガラス、ルーフの位相の比較をFig. 9(下段)に示す。フロントガラスとルーフの位相はFとは異なり、室内側に対して逆位相となっている。これは音響1次モードを増長させる位相の関係であり、音圧低減効果は4dB得られたが、Fの組み合わせに対しては効果が低い。フロントガラス、ルーフ振動ともにFとほぼ同じ振動レベルまで低減できているため、これ以上の音圧低減効果を得るためにはさらに振動レベルを低減する必要があるが、具現化構造に置換するのは困難である。よって位相コントロールによるFの組み合わせの音圧低減効果が従来手法Aの組み合わせよりも高いことが証明された。

開発の初期段階からこのような共振配置を検討してくことで、低周波騒音問題を早期に解決することが可能である。

4.2. ドラミング低減効果

4.2.1. 相関成分抽出結果

ドラミングの実車検証をおこなうテスト車両をbとする。車両bに対して、入力寄与の特定をおこなった。まず入力成分に関してはサスペンション振動として4輪3方向の振動に対する相関成分を式(1)により抽出した。対象の周波数領域では前後方向のサスペンション振動レベルが他の方向よりも高いため、前後方向に着目し、相関成分の比較をおこなった。その結果を Fig. 12 に示す。

この結果より後輪からの入力成分が40Hz 領域では寄与が高いことがわかる。よって後輪サスペンション前後振動を基準としたパネル振動速度成分を同様にして測定結果か

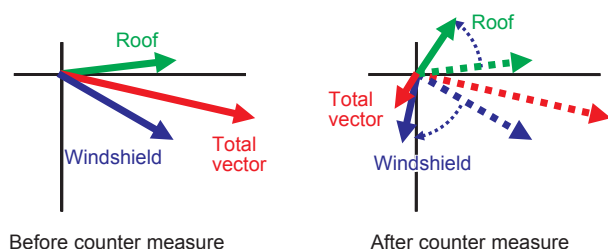


Fig. 10 Panel contribution vector at 43Hz for booming noise

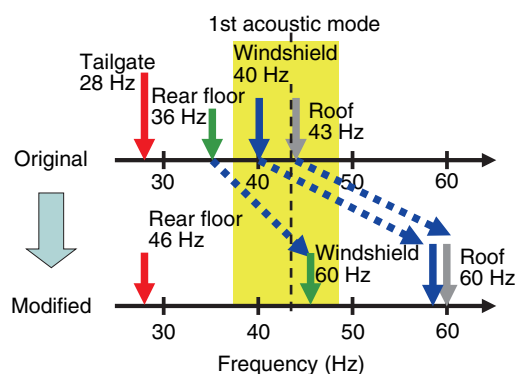


Fig. 11 Modification A of panel resonance

ら算出し、BEM モデルの境界条件として与えた。

Fig. 13 に後輪サスペンション音圧成分と BEM モデルから計算した結果を比較した。低速こもり音解析結果と同様に ± 3 dB 以内の精度が得られた。この結果よりドラミングに対しても相関成分抽出法を適用することにより十分な精度を得られることがわかった。

BEM 解析結果より 43Hz のパネル寄与を確認した結果、テールゲート成分が支配的であり、さらにフロントガラス成分と音響モードを増長する位相の関係であることがわかった。これより対策の方向性としては、まずテールゲート振動の振幅を低減すること、さらにこれら二つのパネルの

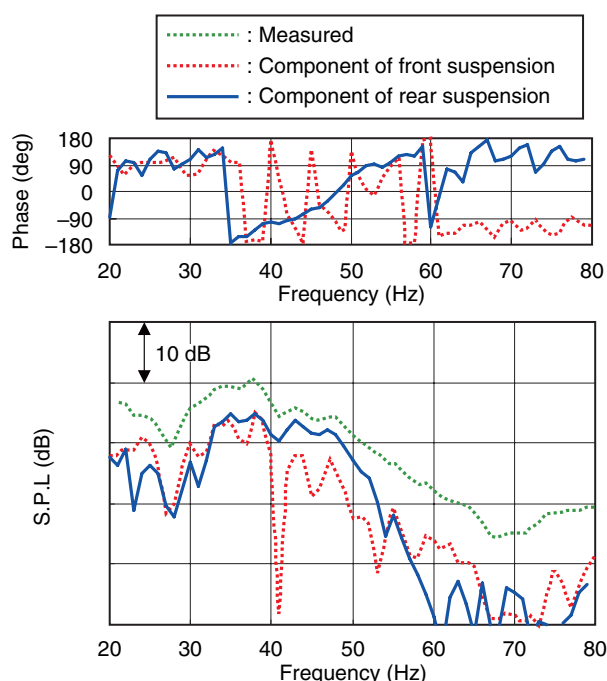


Fig. 12 Result of calculated coherent component

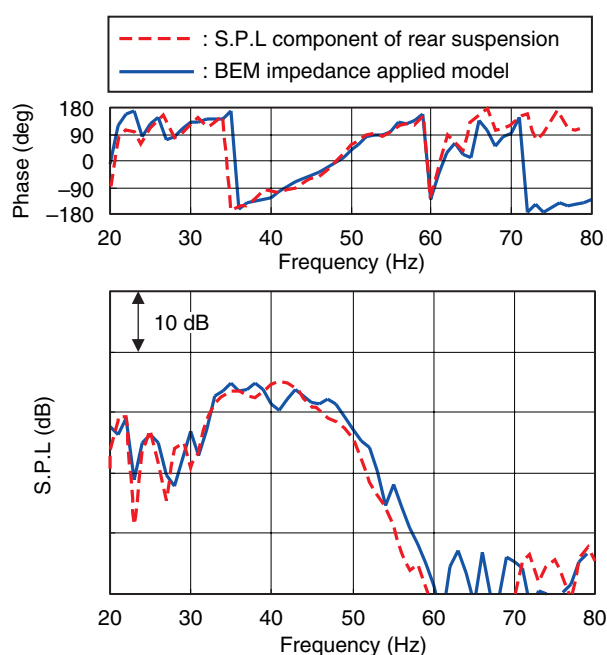


Fig. 13 Compared with S.P.L measured and calculated

位相を音響モードを打ち消す特性に変更することが考えられる。

本テスト車両bのパネル共振配置を確認した結果、Fig. 14のような分布となっていた。特徴としてはルーフの曲率が小さく、共振周波数が高いことと、テールゲート共振周波数が高いことがあげられる。よって音響1次モードの周波数にルーフパネルよりもテールゲートの固有値が近いこと、後者の影響が高いと予測される。よって前述した対策の方向性を考慮するとTable 1のAに相当する組み合わせの音圧低減効果が高いと判断した。フロントガラスの共振を音響モードよりも高くし、テールゲート共振を低く設定することで音響モードの打ち消し効果が得られると予測される。

テスト車両bにおいてフロントルーフレールの剛性対策

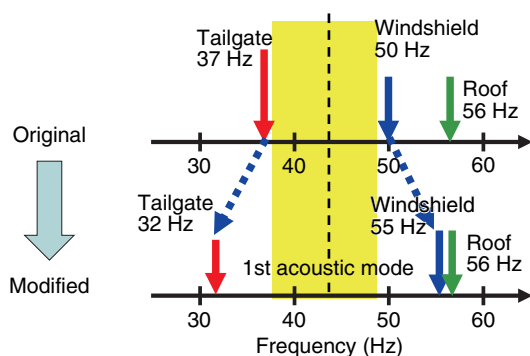


Fig. 14 Modification of panel resonance for drumming

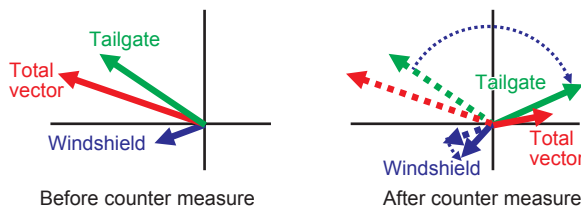


Fig. 15 Panel contribution vector at 43Hz for drumming

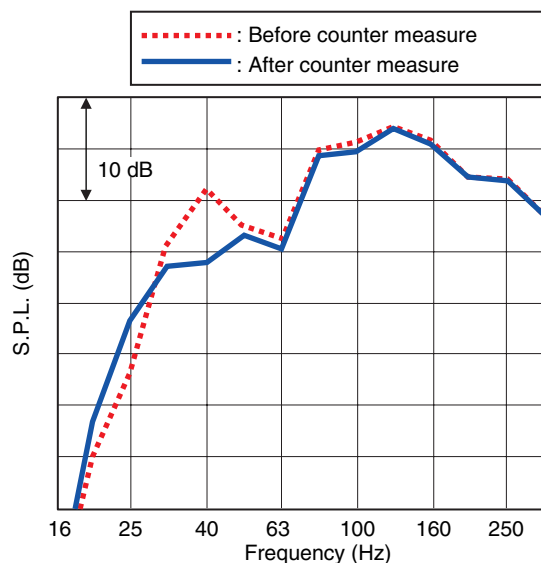


Fig. 16 Effect of panel phase control for drumming

によりフロントガラス共振を5Hz高くし、テールゲートのストッパーを低ばね化することでテールゲート共振周波数を5Hz低くする変更を加えた結果、Fig. 15のようなパネル寄与に変化し、ねらいどおり二つのパネルが音響モードを打ち消す位相に変化した。この位相の関係によりFig. 16のように40Hz領域で-6dBの低減効果が得られた。

5. まとめ

ワゴン・ミニバンにおいて低速こもり音やドラミングなどの低周波騒音に対して以下が明らかになった。

- (1) パネルの位相特性が、その共振周波数でコントロールできることを示し、複数のパネルの共振周波数を適切に配置することで、室内音を打ち消すことを明らかにした。
- (2) パネルの位相コントロールによって室内音が低減できることを、完成車の構造変更で実際に証明し、その有効性を確認した。
- (3) 境界要素法を用いて、パネル振動の測定結果から精度良く音圧を算出し、パネルの音圧に対する寄与や位相の関係を明確にした。
- (4) 相関成分抽出法を用いることで単一入力源の低速こもり音だけでなく、無相関の入力源が複数存在する事象であるドラミングにも適用し、実用上十分な解析精度を得た。

参考文献

- (1) 清野裕之, 山内裕司, 安田仁彦: 構造・音響連成系の実験解析と理論的考察, 日本機械学会論文集, 71巻, 708号, p.39-46(2005)
- (2) 岩間昭憲: 振動と音圧連成系を対象とした実験モード解析手法の開発, 自動車技術会論文集, Vol.24, No.2, p.108-112(1993)
- (3) 谷本隆一, 二宮修, 朝倉孝征: バックドア振動制御によるワンボックスカーのこもり音低減, 日本機械学会論文集(C編), 68巻 668号, p.131-136(2002)
- (4) 今西快友, 長谷川知己, 三橋孝, 小谷野進司: 境界要素法と実測による車室内音場解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.72-05, p.25-28(2005)

■著者■



近藤 隆



須藤 晶



安田 紘之