

自動車の高周波騒音解析のための ハイブリッド SEA モデル化技術

Hybrid SEA Modeling Scheme for Analysis of High-frequency Noise in Passenger Car

見坐地 一人*
Kazuhito MISAJI

多田 寛子*
Hiroko TADA

山下 剛*
Tsuyoshi YAMASHITA

要 旨

ABSTRACT

自動車に関する SEA モデルの解析精度向上を目的としたハイブリッド SEA モデル化手法を提案し、その手法により精度の高い SEA モデルを構築することができた。本稿では、提案した手法の詳細と、モデルを作成するにあたって考案したモデルの精度検証の方法、加えてその検証方法の妥当性について述べる。また、この手法を用いることにより構築した完成車 SEA モデルを自動車室内騒音であるロードノイズの解析に適用し、解析精度の高い結果を得ることができた。

A hybrid SEA modeling method has been developed and applied to increase the accuracy of SEA model for a passenger car. This paper will discuss the detailed workflow of the modeling method and the method employed to verify the accuracy of the model during development. In addition, to provide an example of the high level of accuracy of results, the paper will discuss a road noise (interior cavity sound pressure level.) analysis conducted with a complete vehicle SEA model constructed using the method.

1. はじめに

自動車の車室内における静粛性向上は自動車の商品性能の魅力を上昇する上で重要な項目の一つである。自動車の開発初期段階に騒音振動現象を考慮した設計をおこなうには、さまざまな音や振動の入力源から車室内までの正確な主要パワー伝達経路が表現できる解析モデルを作成し、それを用いることによって得られたロードノイズに関する室内騒音低減の対応仕様を盛り込むことが必要である。しかし、振動の入力源が多いことや伝達経路が数多くある事が、騒音振動問題を複雑にしている。今日では、統計的エネルギー解析手法(SEA)を用いて、周波数域 400-5kHz の自動車における音響系及び構造系伝播音を解析可能になってきている^{(1)・(3)}。さらに、周波数域 200-400Hz における振動問題を解決するためにSEAが効果的に用いられている事例⁽¹⁾もあるが、空気及び固体伝播音の両方に対し入力源から車室内までの正確な主要パワー伝達経路が表現できていない。そこで本稿では、200-5kHz のロードノイズに関する室内騒音を精度良く解析する上で重要な、空気及び固体伝播音の主要伝達経路が正確に表現できる車体系ハイブリッド SEA モデル化手法を考案したので、その詳細と検証結果について報告する。

2. ハイブリッド SEA モデル化手法

本稿で提案するハイブリッドSEAモデルとは、モデル内のエネルギーフローを実車同様に正確に再現するために従来の解析 SEA モデルと実験 SEA モデルを組合せたモデルである。本章では、そのハイブリッドSEAモデル化技術は次に示す6ステップに分けたモデル作成フローより構成されている。

- (1)解析 SEA モデルを作成する。
- (2)パワーを入力する要素を定義する。
- (3)主要パワー伝達経路ネットワーク図を作成する。
- (4)SEA パラメータを実験的に測定する。
- (5)測定で得られたSEAパラメータを(1)で作成した解析 SEA モデルへ置換する。
- (6)ハイブリッド SEA モデル化。

本章では、このフローに従い、その概要について述べる。

2.1. 解析 SEA モデルの作成

解析対象周波数において、各要素内に十分なモードの数が存在するよう各々の要素を定義する。実際の完成車では、100 個程度の構造系要素と 20 個程度の音響系要素に分割できる。SEA パラメータの測定ができない箇所でも要素定義

できるため、要素数は実験SEAモデルの要素数より多くできる。

定義した要素に対しSEAパラメータを理論的に求めSEAモデルを作成する。なお、ここでは市販ソフト AutoSEA-2を用いた。

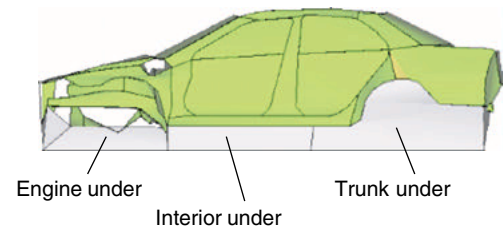


Fig. 1 Power injected acoustic subsystems (under car body)

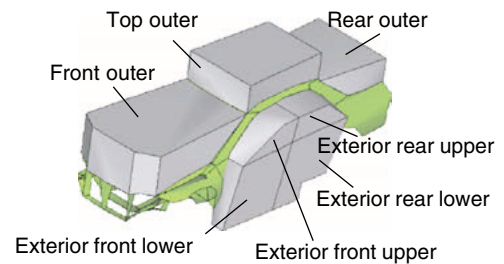


Fig. 2 Power injected acoustic subsystems (around car body)

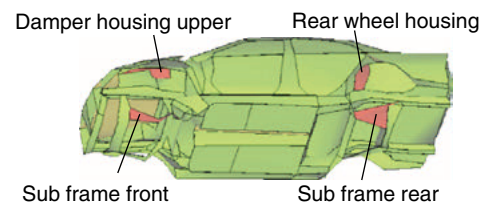


Fig. 3 Power injected structural subsystems

2.2. パワーを入力する要素の定義

要素の中からパワーを入力する要素を選定する。実際の完成車では、音響系要素(Fig. 1, 2)と構造系要素(Fig. 3)を含めて14個程度の要素にパワーを入力する。但し、全体の要素数や入力する要素の数は車の形(セダン車, 1BOX 車, 2BOX 車)やサスペンション形式により異なる。

2.3. 主要パワー伝達経路ネットワーク図の作成

2.2. で定義した各々のパワーが入力する要素毎に、主要パワー伝達経路を選定する。主要パワー伝達経路を選定した後、解析 SEA モデルから主要パワー伝達経路毎のネットワーク図を作成する。一例として Fig. 4 に、フロントのダンパーハウジング(Dpr housing up)にパワーを入力した時のネットワーク図を示す。

2.4. SEA パラメータ測定

作成したネットワーク図中の、各要素間のエネルギー比を測定する。測定したエネルギー比から要素間の Coupling loss factor (CLF) を求める。各要素のエネルギー比の測定と同時に Total damping loss factor (TDLF) を Decay rate 法^{(3), (4)}で測定する。

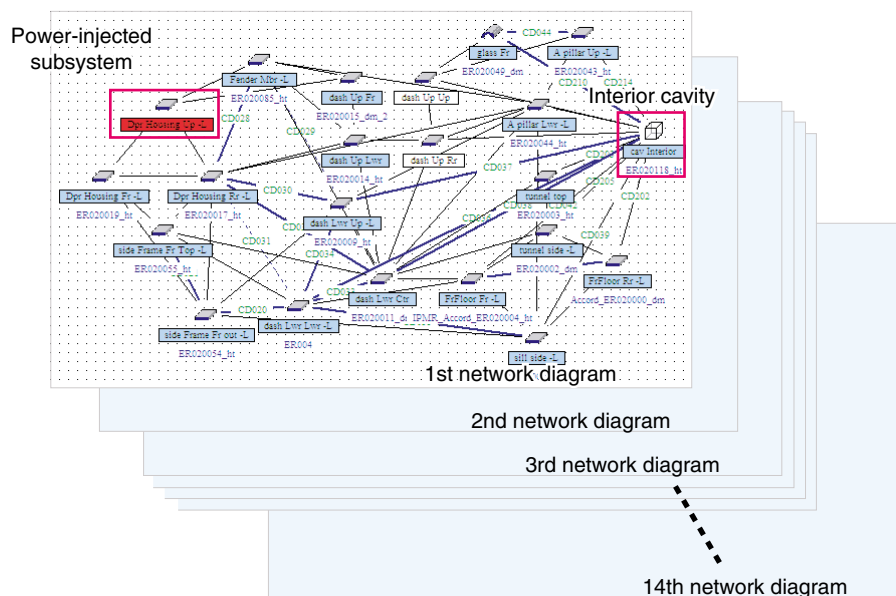


Fig. 4 14 Network diagrams (“Dpr housing up- left” is power injected subsystem)

2.5. 実測 SEA パラメータの解析 SEA モデルへの置換
作成した解析 SEA モデルの SEA パラメータを、実験で求めた SEA パラメータ(TDLF, CLF)に変換する。

2.6. ハイブリッド SEA モデル化

パワーが入力する各要素とその他の要素との間のエネルギー比を、2.5. で作成した SEA モデルから求める。そして2.4.で測定したエネルギー比の実測値と比較する。Fig. 5のネットワーク図中の各要素名の下に表示されている最初の数字は実験で求めたエネルギーがデシベル表示されており2番目にエネルギー比の実験値と計算値の差分がデシベル表示されている。

この差分を小さくするよう要素間のCLFを調整する。このCLFを調整する過程をハイブリッドプロセスと呼ぶ。全てのエネルギー比の差分が $\pm 3\text{dB}$ 以内に収まるまでハイブリッドプロセスをおこなう。これによりエネルギー比の差分が十分小さくなったネットワーク図を Fig. 6 に示す。これら 2.1. から 2.6. のステップが完了するとハイブリッド SEA モデルが完成する。

3. 精度検証

ハイブリッドプロセスにより作成したSEAモデルの精度検証として、まず各要素間のエネルギー比の予測値と実測

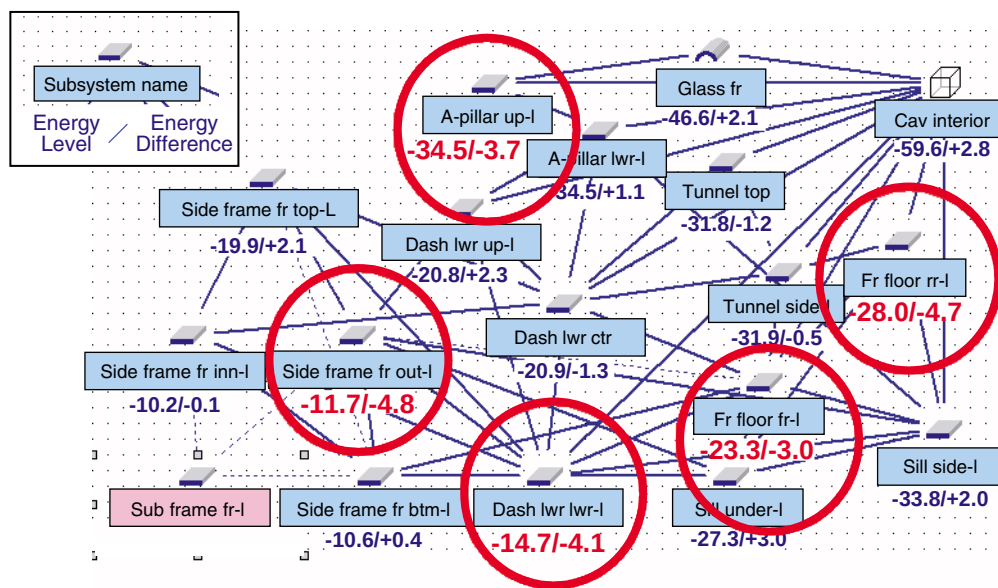


Fig. 5 Network diagram with difference of energy ratio (before hybrid process)

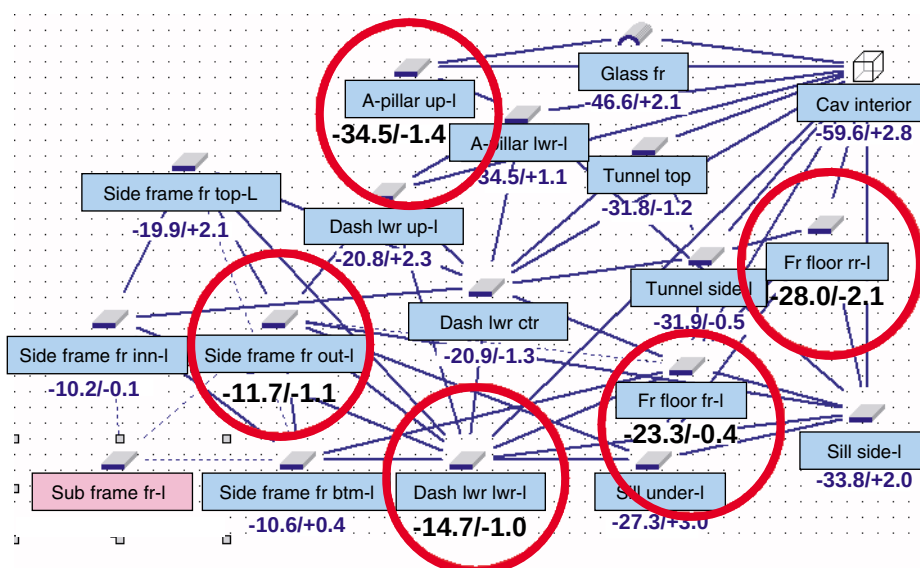


Fig. 6 Network diagram with correct energy flow (after hybrid process)

値と比較した。次に時速 80km で走行した時の入力に基づく車室内ロードノイズの予測値と実測値の比較をおこなった。それぞれの比較結果について以下に示す。

3.1. 各要素間のエネルギー比比較

ここでは一例として、“Front sub-frame”を加振した時の構造系要素(Floor front)及び音響系要素(Interior cavity)でのエネルギー比を比較したものを示す(Fig. 7-a, b)。

これらのエネルギー比の比較から構造系間及び、構造系と音響系間を伝播するエネルギーの流れがそれぞれ、200Hz 以上で±3 dB の精度で再現されていることがわかる。次に、音響系間を伝達するエネルギー流れの一例として、フロア下音場(Interior-under cavity)から車室内音場(Interior cavity)間についての結果を示す(Fig. 9)。この結果から音響系の伝播についても 200Hz 以上において±3 dB の精度で再現されていることがわかる。

3.2. 車室内音予測値と実測値の比較

ハイブリッドプロセスを用いて構築された SEA モデルの精度をさらに検証するために、時速 80km で走行したときの入力に基づくロードノイズを解析した計算結果と実測値による車室内音比較をおこなった。その比較結果を、Fig. 9 に示す。

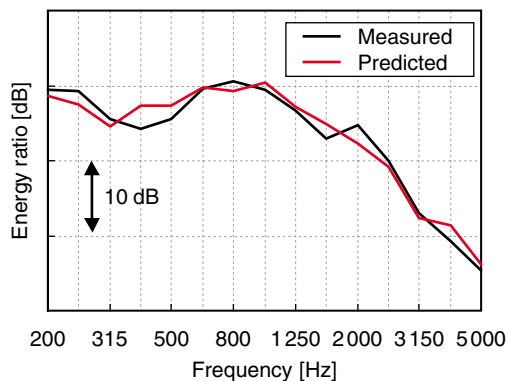


Fig. 7-a Energy ratio (Floor front/Front sub frame)

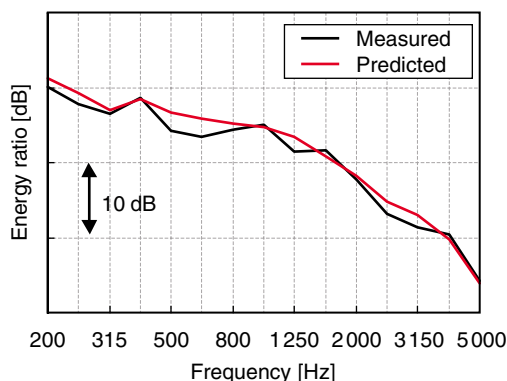


Fig. 7-b Energy ratio (Interior cavity/Front sub frame)

この結果より、その差は±3 dB 以内に収まっていることが確認できた。

4. 解の唯一性について

今回提案した手法によりロードノイズにおける車室内音を精度良く求めることができた。しかし我々は、作成したハイブリッドSEAモデルにより、ロードノイズ入力時において実車の振動と音響特性状態を主要なパワー伝達経路を含めて再現できているかをモデルの唯一性と定義した。そして、その立証ができているかが、モデル精度の高さを決める重要な要素と考えた⁽⁶⁾。各要素間のパワーフローの解析精度を検証する指標として、支配的なパワーフローの相関係数 r_1 (dominant power flow correlation coefficient) とその値を用いた総合相関係数 R (total correlation coefficient) を(1)、(2)式のように定義した⁽⁶⁾。

$$r_1 = \frac{n_1}{N_1} W_1 \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^M r_i \quad (2)$$

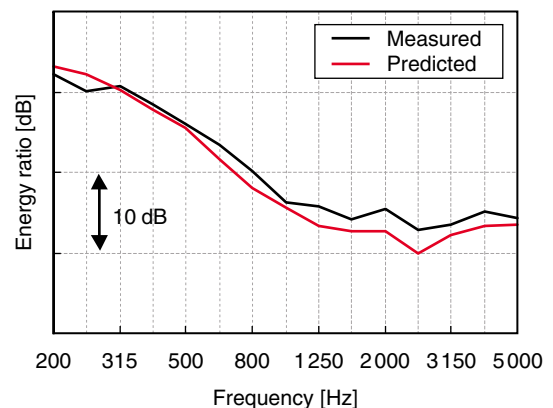


Fig. 8 Energy ratio (Interior cavity/Interior under cavity)

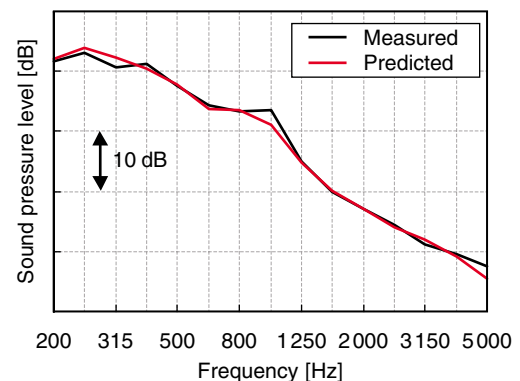


Fig. 9 Interior cavity sound pressure level (road noise analysis 80km/h)

ここで、 n はある周波数において Test Model から求めた支配的なパワーフローとハイブリッド SEA で求めた支配的なパワーフローにおいて重複する要素の数を示す。 N はパワーが入力する要素を除く全ての要素の数を示す。 W_i は i 番目に支配的なパワーフローで生じる車室内音の、トータル音に対する寄与比を示す。 M は寄与順位の数を示している。例として、Fig. 10 に示したパワー伝達経路においては、 $n=2$ (SS2, Interior cavity)、 $N=6$ (SS1からSS5, Interior cavity)となる。1 番支配的なパワーフローの寄与比が 9 割とすると、(1) 式から支配的なパワーフローの相関係数 r_1 は 0.3 になる。(Fig. 10 において実線はハイブリッド SEA で求めた 1 番支配的なパワーフロー、点線は Test Model から求めた 1 番支配的なパワーフローを示す。) これら指標を用いて検証をおこなうために、段階的にパワー伝達経路の精度を上げた実験 SEA モデルと、提案した手法で作成したハイブリッド SEA モデルでの比較検討を実施した。まず実験 SEA モデルを下記の如く 3 段階のエネルギー比誤差を設定して作成したモデルで比較した。

- Test Model 1: 車室内に隣接する全てのパネルからの音響放射 CLF 特性のみを本手法で作成したモデルの特性と一致させたモデル
- Test Model 2: 車室内への入力の約 9 割をカバーする主要なパワー伝達経路において車室内音場要素から 4 番目まで上流の各要素において、要素間のエネルギー比の誤差が実測に対し $\pm 0.5\text{dB}$ 以内にしたモデル
- Test Model 3: Test Model 2 に対し、もう一つ上流の 5 番目までの各要素において、要素間のエネルギー比の誤差を $\pm 0.5\text{dB}$ 以内にしたモデル

次に、Test Model 1 とハイブリッド SEA モデルから求めた車室内のロードノイズと実測値を比較した(Fig. 11)。どちらの結果とも実測値に対し $\pm 3\text{dB}$ の精度で予測できている。しかし、車室内の空間と隣接するパネルの寄与(200Hz の寄与解析結果)を比較すると(Fig. 12)異なっていることがわかる。これは、車室内音が良く一致しても、それが実車状態を再現する唯一のモデルではないことを示している。す

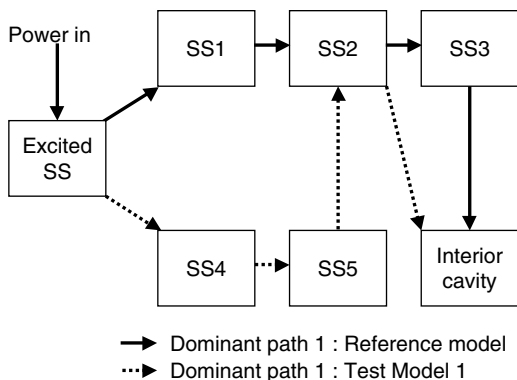


Fig. 10 Simple model for dominant power path investigation

なわち、これは作成したハイブリッド SEA モデルが実車の状態を主要なパワー伝達経路を含めて再現できているモデルであることが立証されていることが必要であることを示している。

その立証として、先に定義した総合相関係数 R を用いてエネルギー伝達経路の解析精度を検証した結果を以下に示す。ロードノイズ評価路面を時速 80km で走行した時の固体伝播音に対し、ハイブリッド SEA モデルに対する Test Model 1, 2, 3 の総合相関係数 R を Fig. 13, Fig. 14 に示す。Fig. 13 は Front sub frame 前側の左側から入力した個体伝播音、Fig. 15 は Front dpr housing の左側からの固体伝播音に対する総合相関係数 R をそれぞれ示す。

これらの結果から Test Model 3 の総合相関係数 R が 1 kHz 以上で 1 に近づき、1 kHz 以下でも 0.8 以上にあることがわかる。この Test Model 3 とハイブリッド SEA モデルの車室内空間に隣接するパネルの寄与を比較したものを Fig. 15 に示す。

Fig. 12 の結果に対し、良く一致していることがわかる。即ち、これは、提案した手法で作成したハイブリッド SEA モデルによって、車室内音を精度良く予想できるだけでなく、実際のパワーフロー状態も精度良く再現していると言え、本モデルがロードノイズを再現する適正なモデルであると言える。

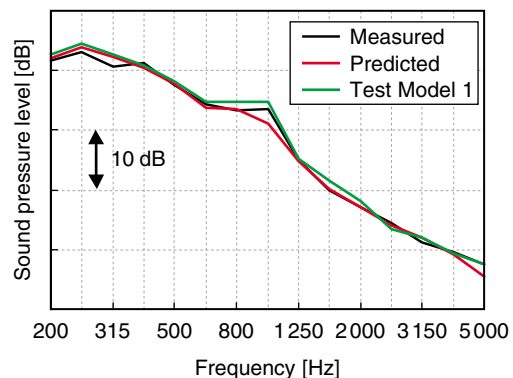


Fig. 11 Interior cavity sound pressure level for investing dominant power path (road noise analysis 80km/h)

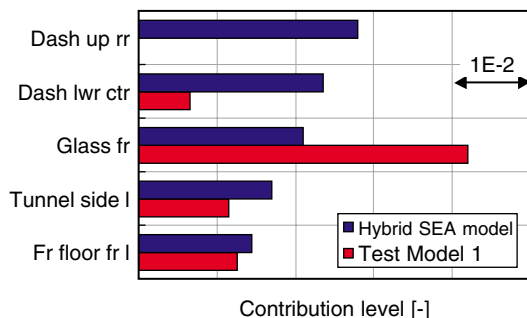


Fig. 12 Power contribution to interior cavity (before hybrid process)

5. 解析応用例

5.1. 車室内に対する構造系入力パワーと音響系入力パワーの寄与分離

上述した唯一の解を導くハイブリッドSEAモデルを用いて、ロードノイズに対し構造系入力と音響系入力の寄与分離を試みた。まず、固体伝播のみによる車室内音を予測し、次に空気伝播のみによる車室内音を予測した。その結果をFig. 16に示す。

この結果から、周波数500Hzまでは構造系入力の寄与が高いのに対し、それ以降の周波数域では音響系入力の寄与が支配的となっていることが確認できる。これは、自動車のロードノイズの定性的な性質をよく表している。

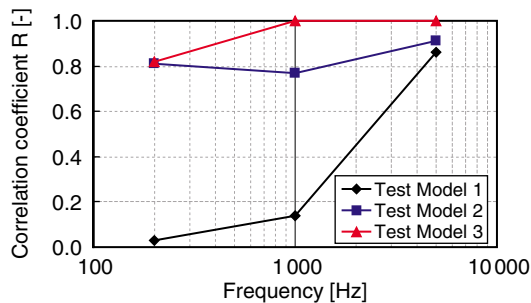


Fig. 13 Correlation coefficient (from Sub frame fr-l to Interior cavity)

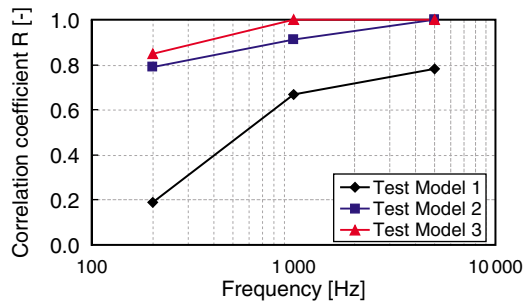


Fig. 14 Correlation coefficient (from Dpr housing to Interior cavity)

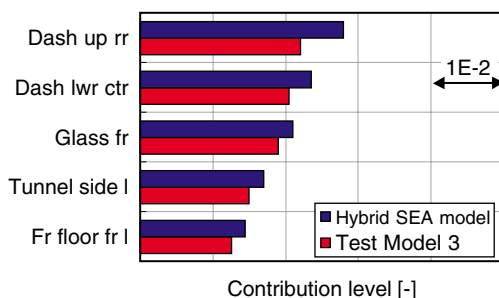


Fig. 15 Power contribution to interior cavity (after hybrid process)

5.2. 車室内に隣接するサブシステムから車室内へのパワー寄与

Fig. 17に、ハイブリッドSEAモデルから求めた車室内空間に隣接するサブシステムから車室内へのパワー寄与を示す。

この結果から、周波数域 200-500Hz では“Rear wheel house”, “Floor”, “Dashboard”, “Tunnel” などの構造系サブシステムからの寄与が支配的であることが確認できる。また、2 kHz以上では、ドア、ドアガラス廻りからの漏れや“Front wind shield”からの音響放射の寄与が高いことも確認できた。従って、このようにして得られた解析結果を用いることによって、効率の良いロードノイズの低減仕様の決定が可能となる。

6. まとめ

固体伝播音を含む 200Hz から 5 kHz のロードノイズを ± 3 dBの精度で予測でき、かつ各サブシステム間のパワーフローも再現できるハイブリッドSEAモデル化手法を提案

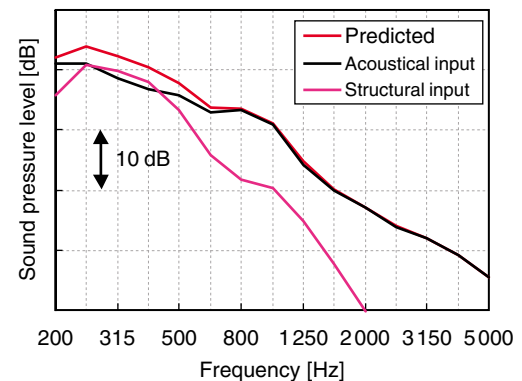


Fig. 16 Contribution to interior cavity sound pressure level

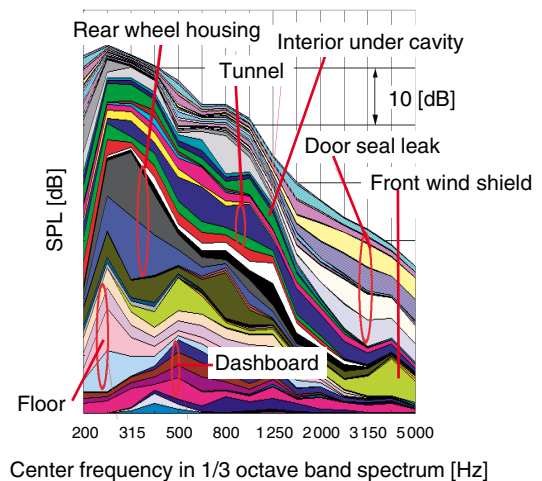


Fig. 17 Power contribution to interior cavity sound pressure level

した。本提案の手法により作成したハイブリッドSEAモデルを用いることによって、固体伝播音と空気伝播音の分離ができ、加えて車室内音に対する音響透過と音響放射それぞれの寄与が求められることから効果効率に優れたロードノイズなどの対策が可能になる。

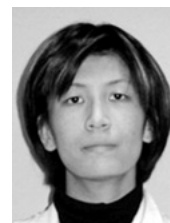
参考文献

- (1) Onsay, T., et al.: Transmission of structure-borne road noise in a mid-size car: statistical energy analysis (SEA), NOISE-CON 98, Ypsilanti, Michigan(1998)
- (2) Dong, B., et al.: Road noise modeling using statistical energy analysis, Proc. SAE N&V Conf(1995)
- (3) 見坐地, 斎藤, 来原, 山下: 統計的エネルギー解析手法 (SEA)を用いた自動車のロードノイズ解析, 1999年自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.71-99, 9939730, p.9-12
- (4) Lyon R. H., Dejong R. G.: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, Butterworth-Heinemann (1995)
- (5) Misaji, K., et al.: Development of a Hybrid SEA Modeling Scheme for a Passenger Car, 2003 SAE World Congress
- (6) Misaji, K., et al.: Testing Uniqueness of Hybrid SEA Modeling Solution for a Passenger Car, 2003 SAE Noise & Vibration Conference & Exhibition

■ 著 者 ■



見坐地一人



多田 寛子



山下 剛