自動車の音響解析のためのハイブリッド SEA モデルと 従来の SEA モデルとの比較 -その 2. ハイブリッド SEA モデルとの比較-

日大生產工(院) 〇髙橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人

1. はじめに

本論は、従来のハイブリッド SEA 法に対して、精度 向上、工数の大幅な削減が可能となったハイブリッド SEA 法について述べる.そして自動車(SUV)の音響解 析に従来の SEA 法とハイブリッド SEA 法を実車の音 響解析に適用したときの工数の内訳、サブシステム数、 実験概要、SEA パラメータの合わせ込みについて比較 し、最後に従来の SEA 法の問題点と、ハイブリッド SEA 法の有用性について述べる.

2. ハイブリッド SEA 法

ハイブリッド SEA 法とは,次の 2.1.から 2.4.の手順に 従ってハイブリッド SEA モデルを作成する方法である. 2.1. サブシステム作成

作成方法はその1.の従来の SEA 法と同様である. FEM データや実車から構造系・音響系サブシステムを 作成する.作成したサブシステムを Fig. 1(a), (b)に示す.

2.2. 材料特性と積層構造の定義

実車に取り付けられている防音材の材料特性や積層 構造を,2.1.で作成したサブシステムに定義し,理論値 のみで SEA パラメータを算出する. その SEA パラメ ータから解析 SEA モデルを作成する.

2.3. エネルギー比, 内部損失率, 結合損失率の測定

実車に加速度ピックアップやマイクを取り付けて, ハンマ加振,スピーカ加振によって,エネルギー比, 結合損失率,内部損失率を測定する.Fig.2はそのとき の計測状況を示す.エネルギー比は,結合損失率を求 めるときに用いられ,さらに2.4.で示す結合損失率と 内部損失率の決定時の基準となる.また本節で示す内 部損失率と結合損失率は,2.4.で決定する結合損失率と 内部損失率の上限値となる.

2.3.1. エネルギー比(Energy Ratio: ER)の測定

応答エネルギーに対する入力エネルギーの比率を求める.構造系要素のエネルギー E_i は、要素iの質量を

 m_i ,空間平均速度の2乗を $\left\langle v_i^2 \right\rangle$ とすると,式(1)から 求まる.

構造系:
$$E_i = m_i \left\langle v_i^2 \right\rangle$$
 (1)

音響系要素のエネルギー E_i は、音場の体積をV、音場の媒質密度を ρ 、媒質を伝わる音の速度をc、空間平均音圧レベルの2乗を $\left\langle p_i^2 \right\rangle$ とすると、式(2)から求まる.

音響系:
$$E_i = \frac{V}{\rho c^2} \left\langle p_i^2 \right\rangle$$
 (2)

2.3.2. 内部損失率の測定

各要素の内部損失率 η_{ti} を式(3)を用いて求める.

$$\eta_{ti} = \frac{6 / \mathcal{V} / \mathcal{K} d \mathcal{G} 空間周波 数平均減衰率}{27.3 \times / \mathcal{V} / \mathcal{V} \cap \mathcal{U} 周波数}$$
(3)



Fig. 1 (a)ハイブリッド SEA Fig. 1 (b) ハイブリッド SEA モデルの構造系サブシステム モデルの音響系サブシステム



Fig.2 エネルギー比,結合損失率,内部損失率の測定

A Traditional SEA Model and a Hybrid SEA Model Comparison through a Real World Application — Comparison with the HSEA Model — Ayumi TAKAHASHI and Kazuhito MISAJI



Fig.3 3 要素間での SEA パラメータの流れ

この各要素の内部損失率 η_{ii} をここでは Total DLF と呼ぶ.この η_{ii} は、要素*i*を加振したとき、隣接する 要素*j*へ流れるパワーの結合損失率 η_{ij} と、その要素 自身の純粋な内部損失率 η_i の合計であると言える.こ の内容について Fig. 3 に示す 3 要素系で詳しく説明す る、要素 1 を加振したときの η_{t1} は式(4)になる.

$$\eta_{t1} = \eta_1 + \eta_{12} + \eta_{13} \tag{4}$$

式(4)より,結合損失率 η_{12} , η_{13} と純粋な内部損失率 η_1 のそれぞれの値は、単体で η_{t1} を超えることはないと言える.つまり η_{t1} は η_{12} , η_{13} , η_1 の合計の上限値となる.同様にして、 η_{t2} , η_{t3} を求める.

2.3.3. 結合損失率の測定

Fig. 3 で示した 3 要素系から,要素 1 と要素 2 を取り 出す (Fig. 4) . P₁ は外部入力パワー, P_{di}は内部損失 パワー, P_{ij} は要素 *i* から要素 *j* への伝達パワーであ る. E_{ij} は要素 *j* を加振したときの要素 *i* のエネルギ ーを示す.要素 2 について平衡式を組み立てると,式 (5),式(6),式(7),式(8),式(9)となる.

$$P_{12} = \omega \eta_{12} E_{11}$$
 (5)

$$P_{21} = \omega \eta_{21} E_{21}$$
 (6)

$$P_{d1} = \omega \eta_2 E_{11} \tag{7}$$

$$\omega \eta_{12} E_{11} - \omega (\eta_{21} + \eta_2) E_{21} = 0 \tag{8}$$

$$\eta_{12} = (\eta_{21} + \eta_2) \frac{E_{21}}{E_{11}} \tag{9}$$

式(9)の $\eta_{21} + \eta_2$ は2要素系で要素2を加振したときの Total DLF になるので,このTotal DLF を η'_{12} とすると 式(10)のようになる.

$$\eta_{12} = \eta_{t2}' \frac{E_{21}}{E_{11}} \tag{10}$$



Fig.4 2要素間のエネルギーバランス

ここで、2.3.2.で求めた 3 要素系で要素 2 を加振した ときの η_{t2} を式(10)の η'_{t2} と入れ替えると式(11)になる.

$$\eta_{12} = \eta_{t2} \frac{E_{21}}{E_{11}} \tag{11}$$

このときの結合損失率 η_{12} を上限値とする. 同様の方法 で残りの η_{ii} の上限値も決定する.

2.4. ハイブリッド化

2.3.で求めた Total DLF である η_{ti} と結合損失率 η_{ij} を 上限値として、実験で求めたエネルギー比と解析 SEA モデルから求めたエネルギー比の差分が±3[dB]以内に 収まるまで,解析 SEA モデルの結合損失率を変化させ る. この過程をハイブリッドプロセスと呼ぶ. ハイブ リッドプロセスは、ソフトウェアにより自動的に行わ れる (Auto Hybrid Process: AHP) . 以下 1)~3)の処理 が自動化される.1)現状のモデルから、各入力要素か ら各応答要素への計算値と実験値のエネルギー比の差 分,および各応答要素に対するパワー寄与度を得る. 2) 1)で得られたエネルギー差分とパワー寄与度から、 エネルギー差分を小さくするための結合損失率変更量 を、3.3.で求めた各要素の結合損失率と Total DLF の上 限値を満たす範囲で決定する.3) エネルギー比の差分 が目標範囲に収まるまで1)と2)を繰り返す. AHP によ り、誰でも、早く、画一的に、高精度なハイブリッド SEA モデルを作成することが可能となる.

以上がハイブリッド SEA モデルの作成方法である.

3. 従来 SEA 法/ハイブリッド SEA 法比較 3.1. 工数内訳

Fig. 5 はハイブリッド SEA モデル作成から防音材の 仕様検討に必要な,一人当たりの実働時間を示す. 従 来の SEA 法は,1000 時間(約4カ月)かかったのに対し て,ハイブリッド SEA 法では198 時間(約25日)であっ た.この結果,ハイブリッド SEA の工数は従来の SEA 法の工数に対し,約1/5 にすることができた.

3.2. サブシステム数

従来の SEA 法では,構造系 216 個,音響系 129 個の サブシステムに分割し解析を行った.それに対しハイ ブリッド SEA 法では,構造系 81 個,音響系 22 個のサ ブシステムに分割し解析を行った.ハイブリッド SEA では音場に面する各パネルにおける音響透過損失を求 めないため,サブシステムを細かくする必要がない.









3.3. 実験概要

ハイブリッド SEA 法では,二人で約40時間掛った. 内訳は実験の準備に15時間,実験に25時間である. ハイブリッド SEA 法では,実験箇所は600箇所と従来 SEA 法(59箇所)に比べが,64 チャンネルシステムによ り一度の実験で15ヶ所のエネルギー比,Total DLF, 結合損失率を同時に測定する.

3.4. 実験データを解析モデルに合わせ込む

ハイブリッド SEA 法のハイブリッド化は,ソフトウ ェアによってすべて自動的に行われるので,工数は約 4時間,さらにハイブリッド SEA 法では音響系・構造 系も考慮されるため,高周波だけでなく,中周波域ま でも解析精度が保障される.

4. 解析結果の比較

4.1. 車室内音圧レベルの比較

その1.で示したた従来のSEAモデルと、本論2.で示 したハイブリッドSEAモデルの解析精度を検証するた め、ロードノイズ評価路面を車速50[km/h]で走行した ときの車室内音圧レベルの解析値を実測値と比較した. その結果をFig.6に示す.この結果から、従来のSEA モデルは630[Hz]以上で実測値と比べ良い結果を得る ことができた.それに対して、ハイブリッドSEAモデ ルは実測値と比べ、各周波数で精度高く求められてい ることが確認できた.

4.2. 従来の SEA モデルとハイブリッド SEA モデ ルによる入出力寄与解析結果

従来の SEA モデルとハイブリッド SEA モデルを用 いた,ロードノイズ入力における寄与解析を行った. Fig. 7, Fig. 8 は従来 SEA モデルとハイブリッド SEA モデルによる入力寄与解析結果を示す. Fig. 9, Fig. 10 は出力寄与解析結果を示す. その1でも説明したが,



1/3 oct Frequency [Hz] Fig. 7 入力寄与解析結果

(従来 SEA モデル, RN50[km/h])



Fig. 8 入力寄与解析結果

(ハイブリッド SEA モデル, RN50[km/h])



250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 1/3 oct Frequency [Hz] Fig. 9 出力寄与解析結果

(従来 SEA モデル, RN50[km/h])





ここで入力寄与とは、車室内に対する入力源のエネル ギー寄与度を表し、出力寄与とは車室内空間に隣接す るサブシステムからの車室内へのパワー寄与を表す.

Fig. 7 の従来 SEA モデルによる入力寄与解析結果で は、630[Hz]から 1600[Hz]にかけて後輪のホイールハウ スからの寄与が高いことが確認できる. さらに 1600[Hz]から 5[kHz]にかけてはエンジンルーム,エン ジン下音場からの寄与が高いことが確認できる. Fig. 8 のハイブリッド SEA モデルによる入力寄与解析結果で は、250[Hz]から 500[Hz]にかけて前後輪のホイールハ ウスの入力寄与が高く,800[Hz]から 5[kHz]にかけて車 室下音場からの寄与が高いことが確認できる. Fig. 9 の従来 SEA モデルの出力寄与解析結果からは 800 [Hz] から 5[kHz]にかけて,フロントドアガラスからの寄与 が高いことがわかる.次に,Fig. 10 のハイブリッド SEA モデルの出力寄与解析結果からは 630[Hz]から 5[kHz] にかけてはフロアからの寄与が高いことがわかる.

これらの結果から従来 SEA モデル,ハイブリッド SEA モデルの寄与解析結果が異なることがわかった.

4.3. 従来の SEA モデルとハイブリッド SEA モデ ルの妥当性検証

4.2.で、従来 SEA モデルとハイブリッド SEA モデル による入出力寄与解析結果が異なったため、どちらの モデルに妥当性があるか検証する必要がある.4.1.,4.2. で入力したロードノイズは車体下からの入力があると 考えられる. そこで本節では、1Wパワーで車室下音 場,エンジン下音場,トランク下音場を音響加振した 時の、フロアカーペットを取り付けた状態と取り外し た状態の車室内音圧レベル差分を両モデルで解析し, 実測値と比較した. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 はそれぞ れ、車室下、エンジン下、トランク下を加振したとき のフロアカーペット有り無しの車室内の平均音圧レベ ル差分を示す.これらの結果から、実測値に対してハ イブリッド SEA モデルが各周波数で±3[dB]以内の解析 精度であることが確認できた.これにより,ハイブリ ッドSEAモデルによる寄与解析結果が正しいことがわ かった.

5. 結論

本論は従来の SEA 法とハイブリッド SEA 法を実 車の車室内音響解析に適用し、工数、実験方法、解 析結果など、両手法を直接比較した.また実車を使 った実験値と解析値の比較から以下のことが明ら かとなった.

1. ハイブリッド SEA 法は従来の SEA 法に比べ,工 数を大幅に削減することができた.

2. 車室内の音圧レベルの実験値と解析値の比較か ら、従来のSEAモデルとハイブリッドSEAモデル は実験値に対して(従来のSEAモデルでは630Hz以 上で、ハイブリッドSEAモデルでは中周波から高 周波にかけて)の精度高くで求めることができた.

3. 従来のSEAモデルとハイブリッドSEAモデルに よる入出力寄与解析結果が異なったため、2つのモ デルを用いて、フロアカーペット有り無しの車室内 音圧レベル差分の解析値を実験値と比較した.その 結果ハイブリッドの精度が高いことがわかり、ハイ ブリッド SEA 法の入出力寄与解析結果が妥当であることがわかった.

4. ハイブリッド SEA 法の予測精度が非常に高いため、出力寄与解析結果から弱点部位の同定でき、フロアカーペットの仕様検討がより精度高くできる.



Fig. 13 平均音圧レベル差分 (トランク下音場)

参考文献

1) 見坐地一人,来原裕司,多田寛子,野口好洋,山下剛,マウリジオ・マントバーニ:自動車用防音パッケ ージの SEA パラメータ予測,2002 年自動車技術会学術 講演会前刷集, No.95-02, 20025495

2) 高橋亜佑美,小林之徳,古株慎一,見坐地一人:自動車の音響解析のための解析的SEAモデルとハイブリッドSEAモデルの比較,2010年秋季大会自動車技術会学術講演会前刷集,No.114-10, 20105791