

ハイブリッドSEA法による自動車の車室内音場解析

日大生産工(院) ○高橋 亜佑美
日大生産工(院) 橋上 聡

日大生産工(院) 中根 彰人
カリフォルニア州立大学 古株 慎一
日大生産工 見坐地 一人

1. はじめに

自動車の走行状態における高周波領域の振動、騒音(ロードノイズやエンジンノイズ)を低減させることは、自動車の商品性能の魅力を向上する上で重要な項目の一つである。しかし、近年の低公害、低燃費化に伴い、自動車の軽量化と防音性能向上は相反するものである。さらに、自動車メーカーにとってこの両立を、短期間でかつ低コストで実現しなければならない。そのため、開発初期段階より車室内騒音をシミュレーションすることは開発効率の観点から非常に重要である。

走行状態における高周波領域の振動騒音解析手法として、統計的エネルギー解析手法(Statistical Energy Analysis Method : SEA法)が一般的に用いられている。しかし、自動車のような構造が複雑で、かつモード数が少ない構造物に対して、SEA法は解析精度において課題があった。

そこで本論では、SEA法の解析精度向上を目的とした手法として、ハイブリッドSEA法を提示し、実車の車室内音響解析に適用した。またこの解析で求めた値と実測値を比較することにより、精度検証を行った。そしてさらに、この手法を用いて実走状態の寄与解析を行ったことについて報告を行う。

2. 解析手法

2.1 統計的エネルギー解析手法(SEA法)

本手法は、高周波領域の振動・音響系応答の統計的平均推定法である。SEA法では、系の音響と振動をともに物理系に共通なエネルギー、パワーを用いて記述する。そして解析対象を複数の要素に分割し、要素ごとの入力パワー、散逸パワーおよび伝達パワーの平衡つりあい関係から各要素の音響・振動エネルギー状態を表す。ここでは各要素において、任意の周波数帯域内では固有モードは一様に分布し、同程度に励起されていると仮定している。したがって、各要素はある周波数帯域内において複数の固有モードが同程度励起されたエネルギー状態

にあり、各要素内部での散逸パワーは要素のエネルギーレベルに比例し、伝達パワーは要素間のエネルギーレベル差に比例するといった扱いが可能になる。

ここで、2要素系で構成されるモデルを図1に示す。要素の散逸パワーの比例定数 η_i を内部損失率、要素間の伝達パワーの比例定数 η_{ij} を結合損失率と称し、式(1)、(2)であらわされる。

$$P_{d1(d2)} = \omega \eta_{1(2)} E_{1(2)} \quad (1)$$

$$P_{12(21)} = \omega \eta_{12(21)} E_{1(2)} \quad (2)$$

したがってこの場合、2要素系のエネルギーのつりあいは、式(3)で表現できる。

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 P_i, P_{di} はそれぞれ要素 i の外部入力パワー及び内部損失パワー、 P_{ij} は要素 i から要素 j への伝達パワーである。

これらの連立方程式を解くことにより各要素のエネルギー状態、伝達パワーなどを容易に求めることができる。

2.2 SEAパラメータの求め方

SEA法で解析を行うには、SEAパラメータ(等価質量、内部損失率、結合損失率)をいかに精度よく求めるかが重要である。

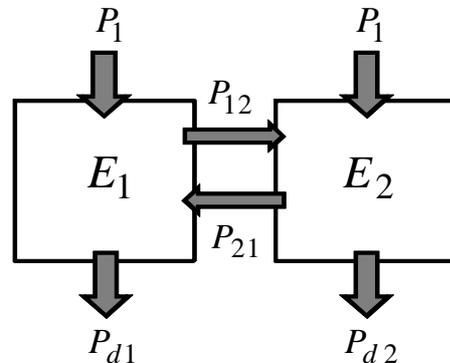


図1. 2要素間のエネルギーバランス

(1)内部損失率の求め方

内部損失に関しては、式(4)のように各要素の自由振動時における1/3オクターブバンド成分波形ごとの対数減衰率を空間平均し内部損失率 η_i を推定する。

$$\eta_i = \frac{\text{各バンド成分空間周波数平均減衰率}}{2.73 \times \text{バンド中心周波数}} \quad (4)$$

(2)等価質量の求め方

各要素のエネルギー E_i と等価質量 M_{eqi} の関係は式(5)で表される。

$$E_i = M_{eqi} \cdot \langle V_i^2 \rangle \quad (5)$$

すなわち等価質量とは、それにその要素の時間空間平均速度の2乗 $\langle V_i^2 \rangle$ を掛け合わせると要素のエネルギー E_i になるもので、内部損失率 η_i を用いて式(6)で表される(r_i は初期減衰率)

$$M_{eqi} = \frac{P_i}{0.23r_i \cdot \langle V_i^2 \rangle} \quad (6)$$

(3)結合損失率の求め方

結合損失率を求める方法として、パワー注入法がある。パワー注入法は、結合状態のままの各要素に個別に既知のパワーを注入しそれぞれの要素のエネルギー状態を計測する内部損失率及び結合損失率を算出する方法である。この考え方を2要素系の例で説明する。

2要素系において要素1のみにパワー注入した場合の平衡式は式(7)となる。

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{21} \end{pmatrix} \quad (7)$$

次に要素2のみにパワーを注入した場合の平衡式は式(8)となる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ P_1 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{21} \\ E_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

これらをまとめると式(9)となる

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ 0 \\ 0 \\ P_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} E_{11} & E_{11} & -E_{21} & 0 \\ 0 & E_{11} & -E_{21} & -E_{21} \\ -E_{12} & -E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & -E_{12} & E_{22} & E_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_{12} \\ \eta_{21} \\ \eta_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)を連立方程式で解くことにより各要素の損失率が求められる。この方法は各要素の内部損失率と結合損失率が一括して同時に求められるため非常に有効な方法に見えるが、実際には各要素に対する平均入力パワー及び平均エネルギーを実験的に、より精度よく求めないと各損失率、特に結合損失率が負になることがある。

自動車のような複雑な構造を扱う本論においては、式(9)において測定誤差の生じやすい微小

項を無視し、支配的な項のみを考慮することにより得られた近似式(10)を用いる。これにより、パワー注入に直接関係している2要素のエネルギーレベルと、各要素の内部損失率のみから結合損失率が求められる。

$$\eta_{ij} \doteq \eta_j \frac{E_{ji}}{E_{ii}} \quad (10)$$

以上の方法により、SEAパラメータを求めることができ、平衡つりあい式を立てることができる。これがSEA法である。

2.3 ハイブリッドSEA法

例えば、現行車両の各要素のエネルギー実測値を $E(Base)$ 、理論的に求めた各要素のエネルギー理論値を $A(Base)$ とする。つぎに現行車両に取り付けているトリムを諸元変更したときの各要素のエネルギー実測値を $E(Mod)$ 、各要素のエネルギー理論値を $A(Mod)$ とする。理論値に対する実測値の比率から以下の関係式が得られる。

$$\frac{A(Base)}{E(Base)} = \frac{A(Mod)}{E(Mod)} \quad (12)$$

式(12)から、以下の式が得られる。

$$E(Mod) = \frac{E(Base)}{A(Base)} \cdot A(Mod) \quad (13)$$

式(13)はトリムを諸元変更した $A(Mod)$ に対して、諸元変更前の実測値 $E(Base)$ と理論値 $A(Base)$ の比率をかけることで、より精度の高い予測値 $E(Mod)$ を求めることを意味する。これがハイブリッドSEA法の基本的な考えである。

3. 解析結果

3.1 ハイブリッドSEA法の精度検証

本論は2.3で提示したハイブリッドSEA法の妥当性を検証するために、一例として、フロアカーペットを取り付けた状態を $Base$ (図2)、撤去した状態を Mod (図3)として、次の手順で検証を行った。

(1) 実車状態での各部位に対して、車室内音の空気伝播音の解析精度を検証するため、1Wのパワーでスピーカー加振を行い実測値と比較した。図4は、エンジンルームから車室内音場への平均音圧レベルを示し、また図5は、左前のホイールハウスから車室内音場への平均音圧レベルを示す。諸元変更前と後の理論値は実測値と比べ、良い精度で求められていることが分かる。

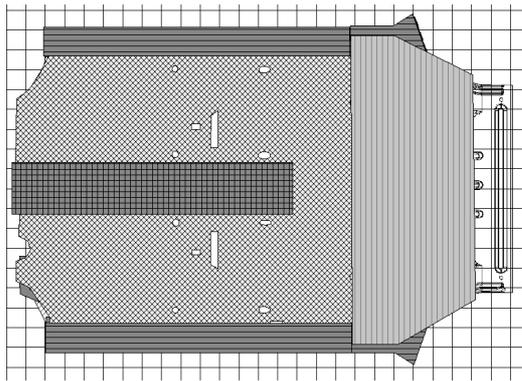


図2. フロアカーペット 撤去前(Base)

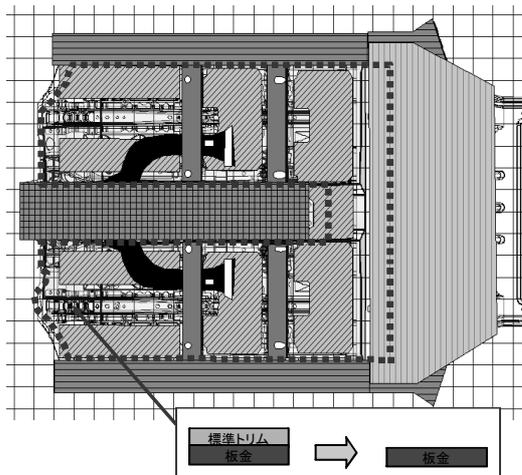


図3. フロアカーペット 撤去後(Mod)

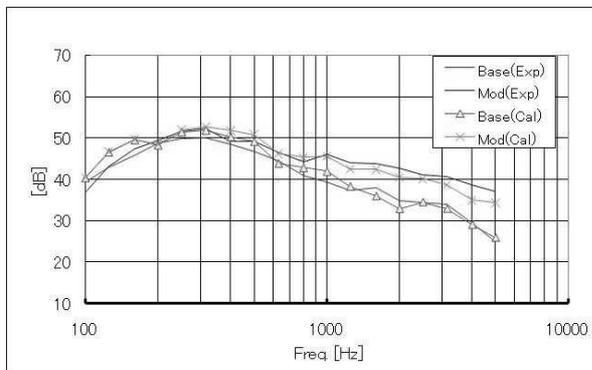


図4. 平均音圧レベル(ENG Room→Cav Interior)

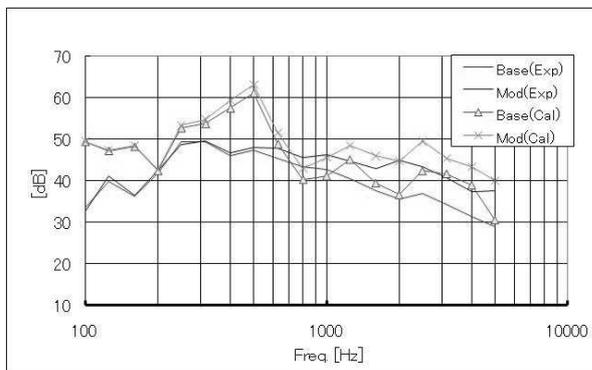


図5. 平均音圧レベル(FrWheelH -L→Cav Interior)

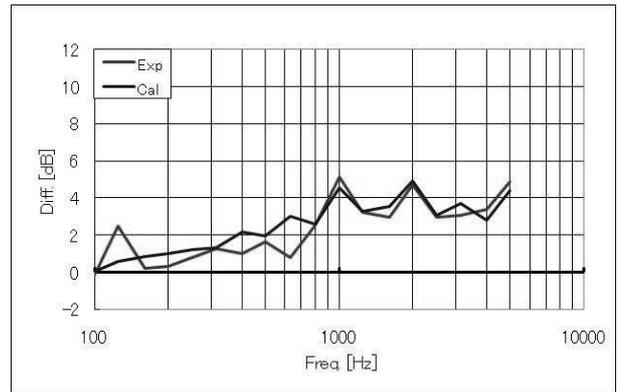


図6. 平均音圧レベルの差分
(FrWheelH -L→Cav Interior)

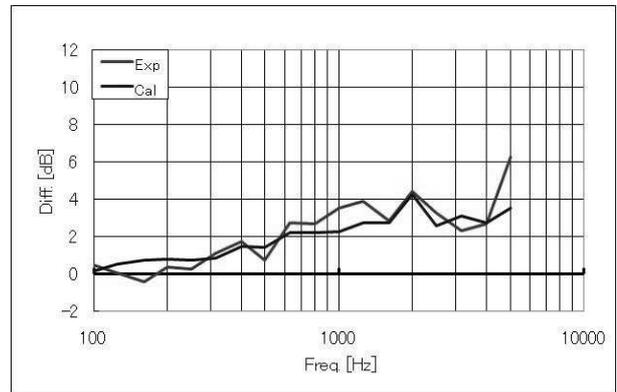


図7. 平均音圧レベルの差分
(ENG Room→Cav Interior)

(2) 実車状態での各部位に対して、車室内音場の固体伝播音の解析精度を検証するため、1Wのパワーでハンマー加振を行い実測値と比較した。図6は、左前のホイールハウスから車室内音場の、フロアカーペットの諸元変更前と後の平均音圧レベルの差分を示す。また図7は、エンジンルームから車室内音場の、フロアカーペットの諸元変更前と後の平均音圧レベルの差分を示す。諸元変更前と後の予測値は実測値と比べ、良い精度で求められていることが分かる。

次に、提示した解析手法で作成した解析モデルを用いて、寄与解析を行った。

3.2 本手法による寄与解析

3.1で示した検証結果より、本解析モデルを用いて、実車の実走状態におけるロードノイズ、エンジンノイズを入力し、車室内音場の出力寄与解析を行った。図8、図9は、フロアカーペットを取り付けた状態と撤去した状態で、それぞれ車速50[km/h]のロードノイズを入力した場合の、車室内に面する各部位からの出力寄与率を示す。図10、図11は、フロアカーペットを取り付けた状態と撤去した状態で、エンジンノイズを入力

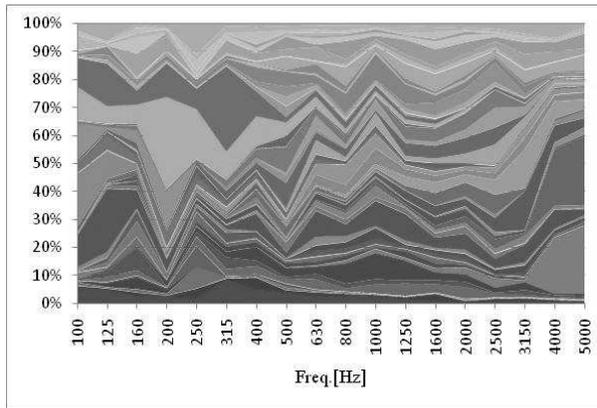


図8. 部位毎の出力寄与率(Base) RN 50 km/h

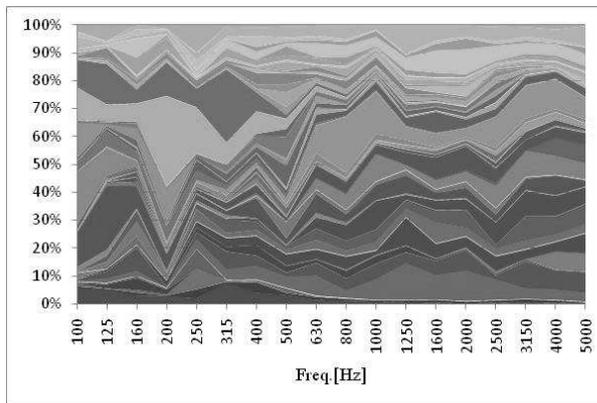


図9. 部位毎の出力寄与率(Mod)RN 50 km/h

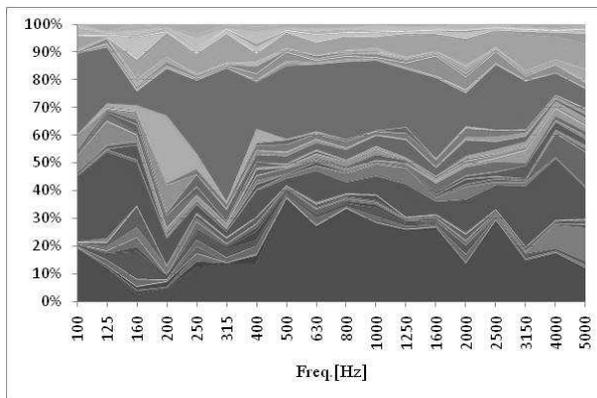


図10. 部位毎の出力寄与率(Base)EN

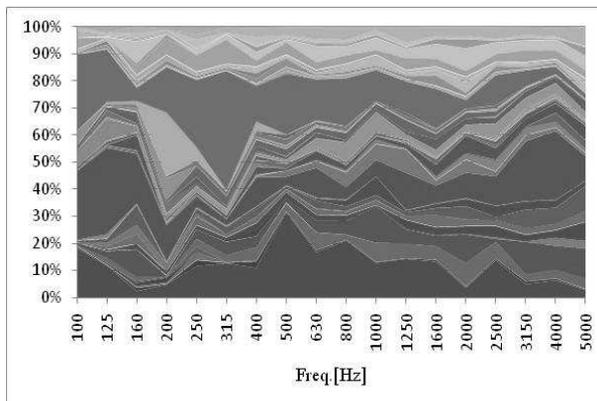


図11. 部位毎の出力寄与率(Mod) EN

した場合の、車室内に面する各部位からの出力寄与率を示す。その結果、図8と図9並びに図10と図11から、フロア部の高周波域の出力寄与率が高くなっていることがわかる。これは、高周波域にとって、フロア部におけるフロアカーペットの役割は重要であることを示している。

4. 結論

本論はSEA法の解析精度向上を目的とした手法として、ハイブリッドSEA法を提示し、実車の実走状態での車室内騒音の予測値と実測値を比較し検証した。さらにトリムの諸元変更時(トリムの撤去前と撤去後)の寄与解析を行った。その結果、提示した解析手法の妥当性が検証できた。また実走状態であるロードノイズ、エンジンノイズを入力した場合の寄与解析を行うことができ、フロアカーペットの重要性を検証できた。

今後は、これらの手法を用いた実車の音響解析が期待できると考えられる。

参考文献

1. 見坐地一人, 斎藤寿信, 来原裕司, 山下剛: 統計的エネルギー解析手法(SEA)を用いたロードノイズ解析, HONDA R&T Technical Review Vol.11 No.2(1999)
2. 見坐地一人, 多田寛子, 山下剛: 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, HONDA R&T Technical Review Vol.16 No.1(2004)
3. Lyon, R.H.: Statistical Energy of Dynamical System, Theory and Applications, MIT Press (1975)
4. N.Lalor, N.: Practical Consideration for the Measurement Structures, ISVR Technical Report No. 182(1990)
5. Cimerman, B.: Overview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis, SAE Paper97 1968
6. 鎌田,竹原,山崎: 統計的エネルギー解析法の自動車振動予測への適用に関する基礎的検討(簡易構造物での検討),自動車技術会論文集, No.4, p.49-54
7. Mark, J.m., et al.: Statistical Energy Analysis for Road Noise Simulation, SAE Paper 97 1971
8. Dennis, W.: An Example of Statistical Energy Analysis(SEA) Application in Vehicle Sound Package Development, RIETER Conference 1999