

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

Analysis of Vehicle Road-Noise Using Statistical Energy Analysis

見坐地 一人*	斎藤 寿信*
Kazuhito MISAJI	Toshinobu SAITO
来原 裕司*	山下 剛*
Yuji KURUHARA	Tsuyoshi YAMASHITA

要 旨

高周波領域の効率的かつ定量的なロードノイズ対策手法の検討を目的として、統計的エネルギー解析手法(Statistical Energy Analysis: SEAと略称)による実車のフルモデル解析を実施し、SEA解析結果から得られた予測値と実測値を比較検討することにより手法の有効性を検証した。

ABSTRACT

For the purpose of the examination of efficient and quantitative Vehicle Road-Noise countermeasure of high frequency range, we enforced the full model analysis of the actual car by using Statistical Energy Analysis (SEA).

And we could verify the validity of SEA method by directly comparing experimental results with the prediction results about the actual car.

1. はじめに

近年、自動車の静粛性向上は低公害、低燃費化とともに自動車の商品性能の観点から重要視されてきた。しかし、低公害、低燃費化に必要な不可欠な軽量化と防音性能は、相反するケースがほとんどである。開発現場では、これら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。これらを効率良く実施するには、開発初期段階に効率的かつ定量的な車室内の騒音対策の提示を可能にする解析シミュレーション技術が必要である。

自動車の振動騒音問題のうち、低周波領域であるアイドリリング時の振動騒音、走行時のこもり音についてはFEM、BEM等のシミュレーション技術を用いて騒音予測及び対策が図面段階で検討できるようになってきた。

しかしながら、高周波領域のロードノイズ、エンジンノイズに対しては有効な解析手法が実用化されていないのが現状である。高周波領域の振動騒音解析シミュレーション技術としては、船舶や宇宙ロケットなど大型構造物への適用例が多く見られ、最近自動車についても適用例が報告されている統計的エネルギー解析手法(SEA)がある。SEA法は解析対象物の各要素が持つ音響・振動エネルギーを、空間平均及び周波数平均的に表現し、各要素のエネルギー釣合から構造物内のエネルギーの流れをとらえることができるため、振動騒音対策を効果的に行うことが可能である。そ

*栃木研究所

こで本論では、SEA法による自動車の高周波領域の振動騒音対策を可能にする解析シミュレーション技術の実用化への有効性検証を目的として、SEA法によるロードノイズに対する実車フルモデル解析を実施したので、その結果を報告する。

2. SEA法

2.1. 理論

SEA法は、1960年代にLyon¹⁾らにより開発された高周波領域の振動・音響系応答の統計平均的推定法である。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、散逸パワー及び伝達パワーの平衡釣合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Fig.1に示す。

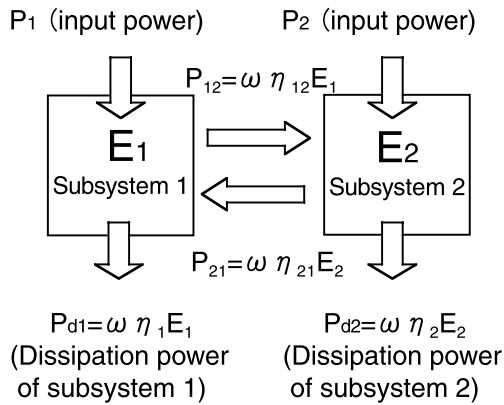


Fig.1 Energy balance between two subsystems

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)で表される。

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

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

したがってこの場合、2要素系のエネルギーの釣合は(3)式で表現できる。

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

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

(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各1/3 Oct.Band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。

$$\eta_i = \frac{\text{各バンド成分空間周波数平均減衰率}}{27.3 \times \text{バンド中心周波数}} \quad (4)$$

(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)

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

(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し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のみにパワーを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。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ P_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

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)の連立方程式を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により精度良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²⁾。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。

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

3. 実車のSEAフルモデル解析

3.1. SEAフルモデル解析の目的

自動車におけるSEAの応用例としては、ロードノイズに対するリヤサスペンションからの固体伝播音低減を目的とした解析例³⁾や、固体伝播音入力に対するフロアの制振材効果を解析したもの⁴⁾など等、部分的なものや固体伝播音のみを扱った例はあるものの、空気伝播も含めた実車1台すべてをSEAモデル化し解析した例は少ない。

本論文では実車1台分を各要素に対して前記2. 2. の手法を用いて求めたパラメータによってSEAモデル化した。そのモデルを用いて空気伝播音も含むロードノイズ入力に対する車室内音低減対策検討を実施し、次のことを確認した。

- (1) 車室内音レベルを低減する対策手法の方向性を、実車のSEAフルモデル解析により求められるのか。
- (2) その結果によって、SEA法が自動車の高周波領域ロードノイズ低減対策を可能にする解析シミュレーション技術として精度は十分か。

3.2. SEAモデル化と精度

(1) 要素分割

要素分割は1部材1要素を基本に考えたが、モード密度の低い部材に対しては要素としない。この考え方をもとに、実車を51要素に分割した。

(2) SEAパラメータ

まず、要素の内部損失を構造系と音場系にわけて求めた。構造系に関しては、要素の点をランダムに5～6点ハンマ加振し、その空間平均した自由振動加速度波形を用いて式(4)から内部損失率を求めた。例として、フロアパネルの内部損失をFig.2に示す。

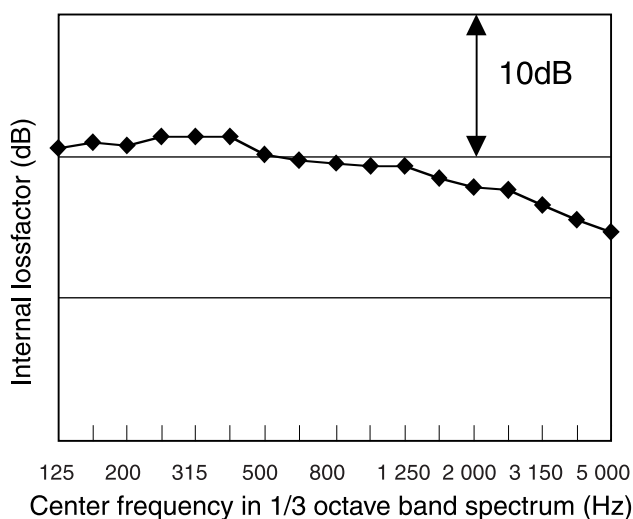


Fig.2 Internal loss factor of floor

音場系に関しては、音響加振時における音場要素のランダムな位置5～6点の自由振動音圧波形を用いて同様に式(4)から内部損失を求めた。例として、キャビン音場の内部損失をFig.3に示す。

次に、各要素の内部損失率を式(6)に代入することにより要素の等価質量を求めた。

結合損失率はパワー注入に直接関係している2要素のみを考慮した近似式(10)から求めた。求め方はパワー注入時の各要素の空間平均した応答速度の2乗値に、式(6)で求めた等価質量を掛け合わせ要素のエネルギーをまず求める。次に、注入するパワーと各要素のエネルギーを式(10)に代入し結合損失率を求めた。この方法で求めたフロアパネルとキャビン音場間の結合損失率をFig.4に示す。

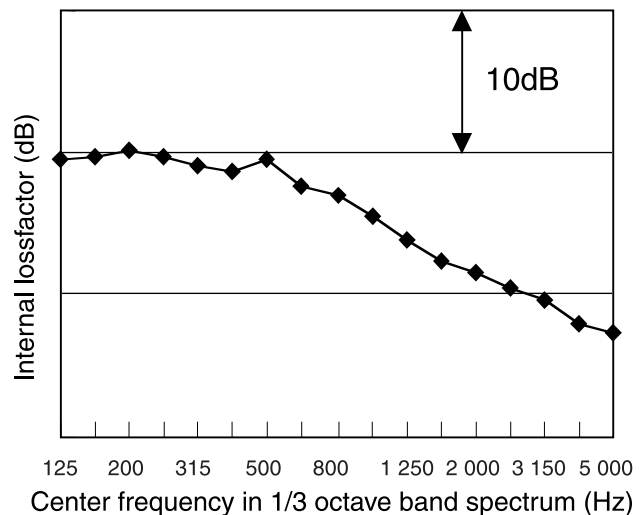


Fig.3 Internal loss factor of cabin

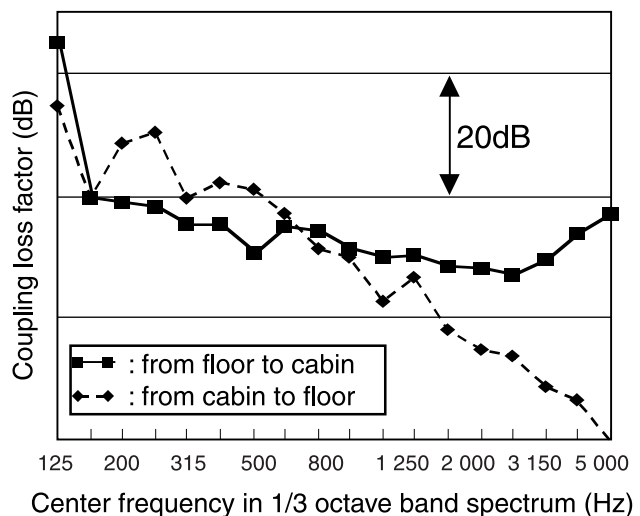


Fig.4 Coupling loss factor from floor to cabin (from cabin to floor)

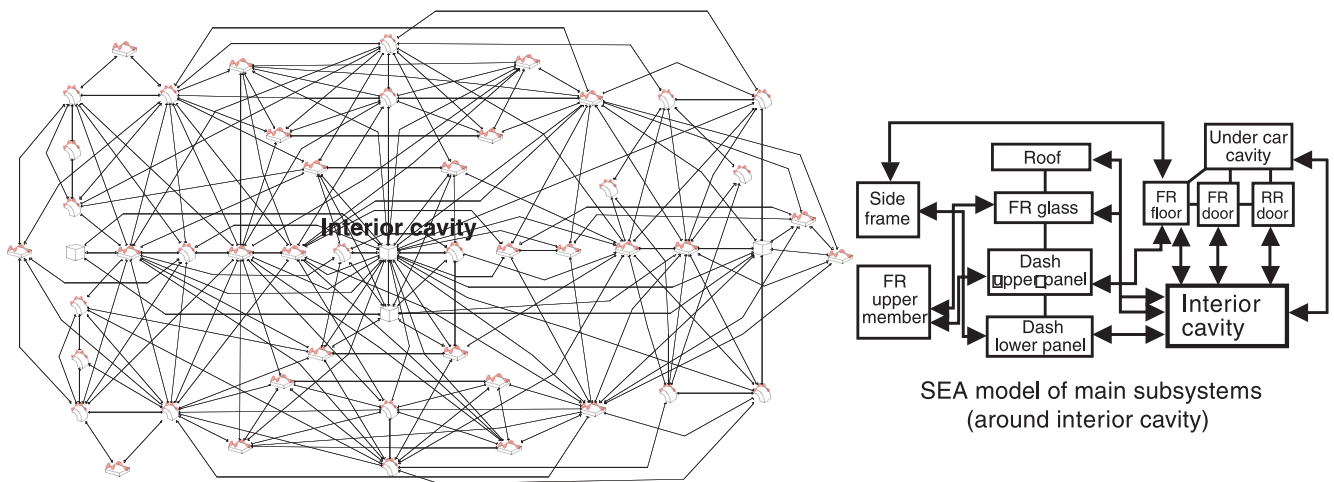


Fig.5 SEA model of actual car by AutoSEA

(3) 実車のモデル化と精度

要素分割した51要素に対し、(2)の方法でSEAパラメータを求め、それを用いて実車のSEAモデルをAutoSEAを使って作成した。作成したSEAモデルをFig.5に示す。モデルの精度検証として、リヤサスペンションの車体取付点における単位入力当りの車室内平均音圧の実測値と、SEAモデルから求めた予測値を比較検討した。比較したグラフをFig.6に示す。解析精度としては、400Hz以上で ± 3 dB以内となっている。但し、400Hzより低い周波数領域ではモード密度が低いためSEA適用の限界に近いこともあり ± 3 dB以内に入っていない。構築したSEAモデルに、実際路面を走行した時のいわゆるロードノイズ入力としてのサスペンション取付点からの入力及びタイヤの音響入力を与え、車室内音圧レベルを予測した。車室内音圧レベルの予測値と実測値の比較を、車速が60km/hおよび80km/hについて実施した結果をFig.7, Fig.8に示す。いずれも実機ロードノイズの再現性の精度としては、周波数400Hz以上(1/3 Oct.Band)で ± 3 dB以内であることが確認できた。

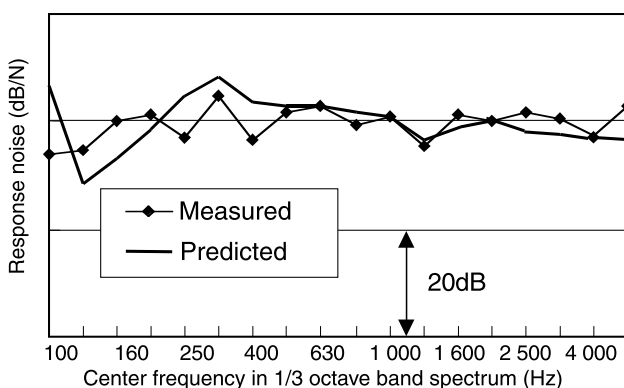


Fig.6 Response from rear suspension to cabin noise

3. 3. ロードノイズ入力解析

本解析モデルを用いて、上記ロードノイズ入力としての音響・振動入力における車室内音圧に対する各要素からのエネルギーフローを求めた。Fig.9は、ロードノイズ入力に対して、車体各要素のうちキャビン回りの特にエネルギー

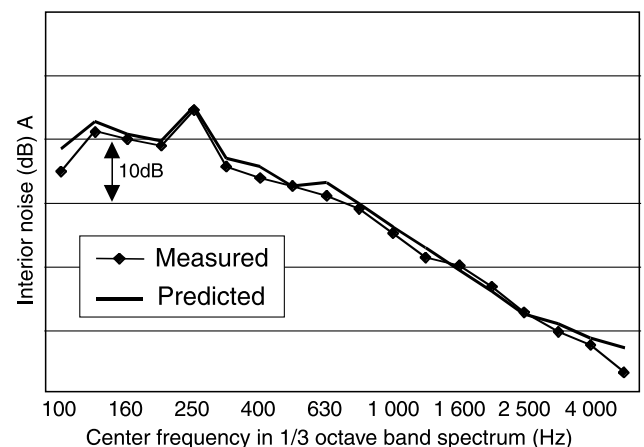


Fig.7 Interior road noise at 60km/h

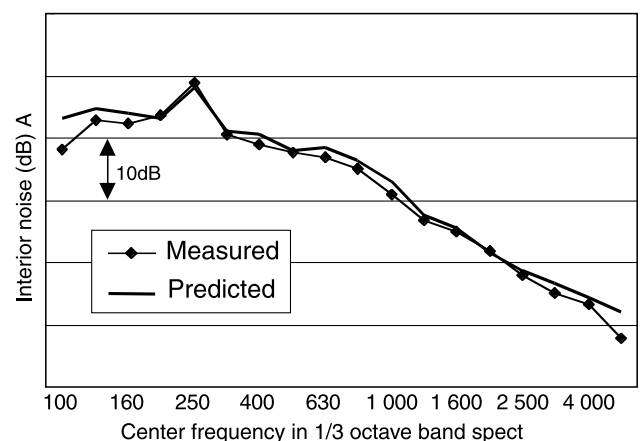


Fig.8 Interior road noise at 80km/h

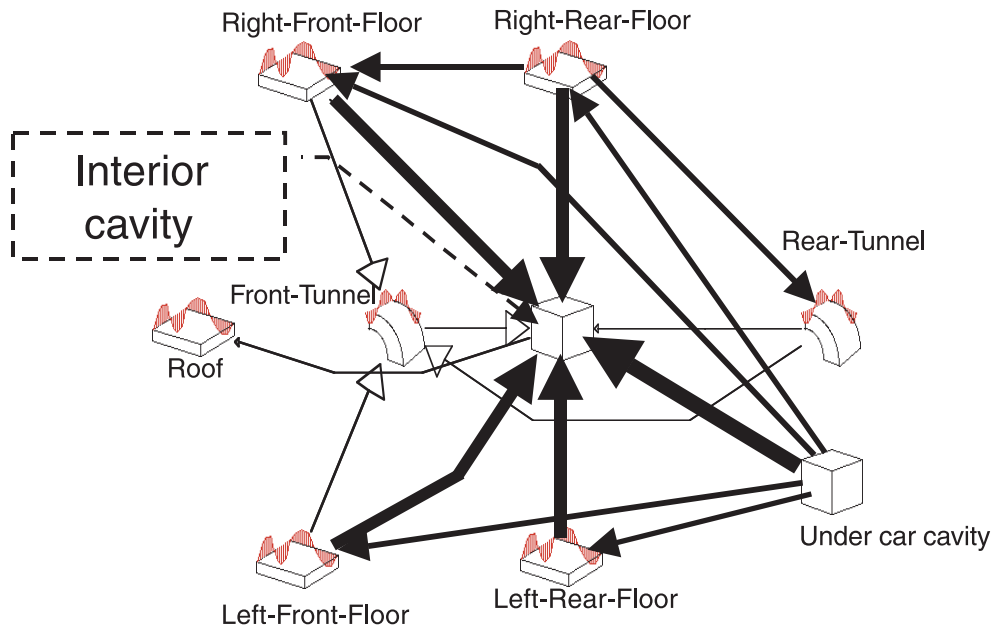


Fig.9 Visualization of energy flow by AutoSEA

フローの大きい主要要素についての音響・振動エネルギー流れを図示したものである。

図中矢印の向き、太さはそれぞれエネルギーの向き大きさを表す。

この図から、エネルギーがどこをどのように伝播し車室内音になっているのかが把握できる。

この結果をもとに、対策箇所選定及び、対策手法を検討した。本解析モデルの場合、フロア下からの音響透過の影響と、フロアパネルからの音響放射の影響が高いことがわかり、重点的にフロアの防音対策を施した。車速が60km/hに対し、対策前後の車室内音圧レベルの実測値の比較をFig.10に、予測値の比較をFig.11に示す。又、対策後の実測値と計算値との比較をFig.12に示す。Fig.10～12から、前述3. 2. におけるモデルの解析精度と同様に、周波数400Hz以上(1/3 Oct.Band)で解析精度 ± 3 dB以内であることが確認できた。

すなわちこのことは、ロードノイズに対するSEAモデルによる各要素のエネルギー伝達寄与解析及び対策検討が可能であることを意味する。

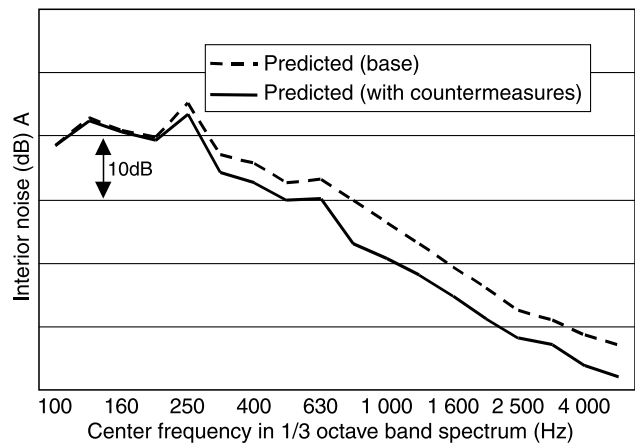


Fig.11 Interior road noise at 60km/h (Predicted)

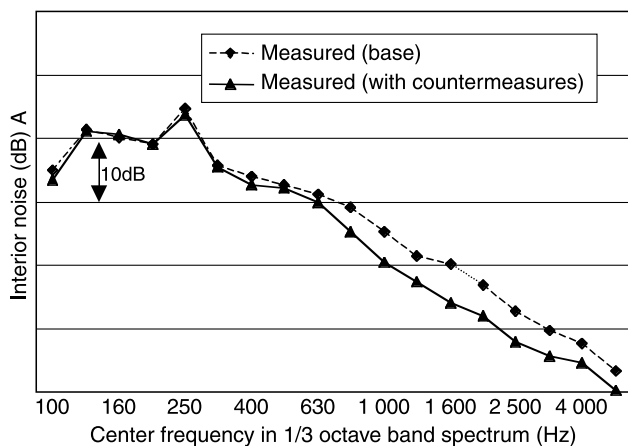


Fig.10 Interior road noise at 60km/h (Measured)

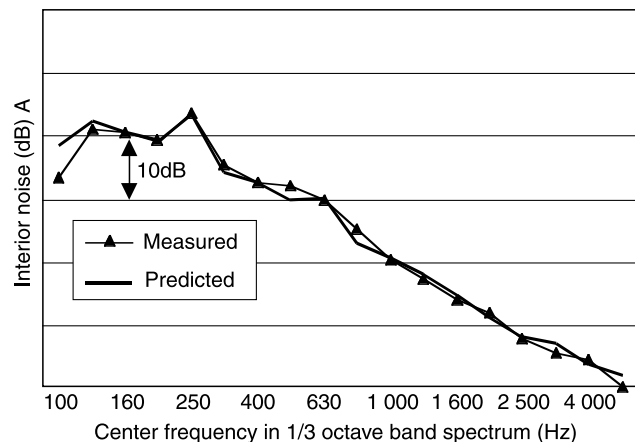


Fig.12 Interior road noise at 60km/h (with countermeasures)

4. まとめ

SEA法を用いた実車のロードノイズ解析結果から以下のことがわかった。

- (1) 提示したSEAパラメータ推定方法と、それを用いたSEAモデル化手法により、実車のSEAフルモデル化が±3dBの精度で可能である。
- (2) 実車のSEAフルモデルを用いた解析により、ロードノイズに対する各要素の音響・振動エネルギー伝達寄与が一目で把握でき、どこをどのように対策すれば良いかがわかる。又、対策後の車室内音レベルの予測も可能であることから、効率的かつ定量的な車室内のロードノイズ対策が可能である。
- (3) 以上の結果よりSEAは、高周波領域のロードノイズ対策を可能にする解析シミュレーション技術として有効であることが検証できた。

今後は高周波領域のエンジンノイズ解析にSEAを適用し、その有効性を更に検証する。また、SEA解析精度向上を目的とした精度の高いSEAパラメータ測定方法、入力パワー推定方法に加えて、SEA法のモデル化にとって重要な要素分割判断基準化にも取り組んでいきたい。

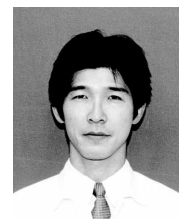
参考文献

- 1) Lyon, R.H. : Statistical Energy of Dynamical Systems, Theory and Applications, MIT Press (1975)
- 2) N.Lalor, N. : Practical Consideration for the Measurement of Internal and Coupling Loss Factors on Complex Structures, ISVR Technical Report No.182 (1990)
- 3) Cimerman, B. : Overview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis, SAE Paper97 1968
- 4) 入江 : SEA法を用いた制振材の評価手法について, 自動車技術会技術報告シリーズ23 自動車におけるダンピング技術, p.235-240
- 5) 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, Vol.28, No.4, p.49-54
- 6) Mark, J.M., et al. : Statistical Energy Analysis for Road Noise Simulation, SAE Paper 97 1971
- 7) Dennis, W. : An Example of Statistical Energy Analysis (SEA) Application in Vehicle Sound Package Development, RIETER Conference 1999

■ 著 者 ■



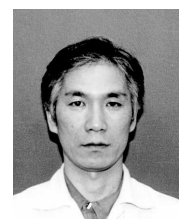
見坐地一人



斎藤 寿信



来原 裕司



山下 剛