G1010503

音場を評価対象とした場合の SEA と逆行列 TPA の比較*

黒田 勝彦^{*1}Comparison between SEA and Inverse matrix TPA for the case of Evaluation Target
at Sound FieldKatsuhiko KURODA^{*1}^{*1} Nagasaki Institute of Applied Science Dept. of Mechanical Engineering
Abamachi 536, Nagasaki, 851-0193 Japan

The comparison method between input powers and contribution rates from power sources to a simple structure consisting of two flat plates and a partial car model consisting of four subsystems in machine operation determined by SEA and inverse matrix TPA was proposed by the authors in the past studies, and the validity of this method was shown. However, it is necessary to extend to the sound fields in order to realize utilization of this comparison method. In this paper, the method is validated through numerical analyses, using a finite element method of a simple structure consisting of seven plate structure including one internal sound field. As a result, the SEA vibrational input power is spatial averaged over each subsystem quantitatively agrees with the TPA input power expressed as the product of the force and velocity at the excitation point. The SEA acoustical energy qualitatively agrees with the TPA acoustical energy. The contribution rates from a power source, when applying the new method to make a comparison between the SEA and TPA results, the effectiveness of the method has been verified.

Key Words : Statistical Energy Analysis, Transfer Path Analysis, Identification, Simulation

1. 結 言

これまでに統計的エネルギー解析法(Statistical Energy Analysis;以下 SEA)と周波数応答関数 (Frequency Response Function;以下 FRF) をベースとする伝達経路解析 (Transfer Path Analysis;以下 TPA) に関する研究としては、文献(1)で示すように SEA の予測精度向上を目的に、逆行列 TPA で予測した力の結果を援用し SEA の入力パワーとして使用された例は見られるが、両手法で得られた様々な結果において比較検討された文献は見受けられない。著者らは、両手法を比較するための基礎検討として、振動系について複数の加振源の入力と加振源から評価点までの伝達経路の寄与に関して両手法が比較できる評価方法を提案し、2 要素以上で構成される薄板や薄板とフレーム構造を組み合わせた複合構造物を対象に有限要素法による数値解析を用いて提案法の有効性を検証してきた⁽²⁾⁽³⁾。本報では、車の内部音響空間を模擬した簡易な板構造物を対象に、その内部音場を評価対象とした場合の SEA と逆行列 TPA による比較評価方法を提案し、その有効性を数値解析により検証することを目的とする。

2. SEA と TPA の基礎理論

2・1 SEA 基礎式

SEA は、対象系 (system) を要素 (subsystem) の集合体とみなし、要素間のパワー平衡に着目する。 r 要素からなる系の SEA 基礎式は、

^{*1} 正員, 長崎総合科学大学 (〒851-0193 長崎県長崎市網場町 536)
E-mail: kuroda_katsuhiko@nias.ac.jp

$$\mathbf{P} = \omega \mathbf{L} \mathbf{E} \quad (1)$$

である⁽⁴⁾。ここで、 ω は中心角振動数、 $\mathbf{E}$ は要素エネルギーベクトル、 $\mathbf{P}$ は入力パワーベクトルである。損失率マトリクス $\mathbf{L}$ は、内部損失率 $\eta_{i,i}$ (Internal Loss Factor; 以下 ILF) と結合損失率 $\eta_{i,j}$ (Coupling Loss Factor; 以下 CLF) を成分とする。ILF と CLF を評価し、損失率マトリクス $\mathbf{L}$ を生成することを SEA モデルの構築と称す。実験 SEA モデルの構築は、パワー注入法 (power injection method: 以下 PIM) を用いて損失率の評価を行う。

損失率の算出後、実稼動時の各要素の振動エネルギー E_i を算出する。各要素エネルギーの計測後、各周波数帯域の各要素の系外からの振動入力パワーを予測する。2 要素系の場合、以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \omega \begin{pmatrix} \eta_{1,1} + \eta_{1,2} & -\eta_{2,1} \\ -\eta_{1,2} & \eta_{2,2} + \eta_{2,1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

入力パワーは、式(2)のように角振動数と損失率、そして位相情報を持たない要素エネルギーの積で示されるため、位相情報は持たない。

2・2 TPA 基礎式

TPA は、対象とする系をいくつかの系に分離し、各分系に作用する力による入力 (単位は N) とそれらに対応する FRF (モビリティ, 単位は m/(Ns)) の積として応答に占める寄与を同定する。逆行列法による入力の予測は、次式で表される。

$$\{F_n\} = [H_{mn}]^{-1} \{v_m\} \quad (3)$$

ここで、 $[H_{mn}]$ は FRF 行列、 $\{F_n\}$ は入力ベクトル、 $\{v_m\}$ は出力ベクトルであり、添え字 m は応答節点番号、 n は入力節点番号を表す。 $[H_{mn}]$ は実稼動の前に加振実験により計測し、 $\{v_m\}$ を実稼動時に計測する。また、FRF 行列内のそれぞれの応答は、以下のように振幅と位相から生成される。

$$H_{mn} = \left| \frac{v_m}{F_n} \right| (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (4)$$

ここで、 j は虚数単位である。

予測された入力ベクトルも、FRF 行列、出力ベクトルともに位相情報があるため、位相情報を有する。

音場評価点までの入力点からの寄与率 C_{pa} は、以下の式で評価される。

$$C_{pa} = \frac{\frac{p_k \times F_k'}{F_k}}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{p_k \times F_k'}{F_k} \right)} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

2・3 SEA と TPA の振動場の比較評価法

振動系について、加振源の入力と加振源からの伝達経路の寄与に関して SEA と TPA を比較するため、逆行列法による TPA の基礎式から SEA の物理単位であるパワー[W]に注目した比較評価法を提案した⁽²⁾。

TPA に関して、2.2 節で示した逆行列法による式(3)で同定した入力とその入力点の応答を用いて、次式より入力パワーで定義する。

$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [F_n' V_n^*] \quad (6)$$

ここで、 $\text{Re}[\cdot]$ は実数部、 F_n' は同定した入力、 V_n は入力点 n の速度応答スペクトル、 $*$ は複素共役である。これより、式(2)で示す SEA の算出式は、空間平均した要素の入力パワーを表わし、式(6)で表わす TPA の算出式は入力点の入力パワーとして、両手法の比較が可能となる。

SEA では、 j 要素に評価点がある場合、文献(2)より次式で示す CLF を使った寄与式を提案している。

$$C_{i,j} = \frac{\omega \eta_{i,j} E_i}{\omega (\eta_{i,j} E_i + \eta_{j,i} E_j)} \times 100 = \frac{\eta_{i,j} E_i}{\eta_{i,j} E_i + \eta_{j,i} E_j} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

また文献(3)より寄与率が負の値となる場合への対策法として、次式で示す要素エネルギー比を使った寄与式を提案している。

$$C_{i,j}' = \frac{E_j' / P_i \times E_i}{(E_j' / P_i \times E_i + E_i' / P_j \times E_j)} \times 100 \quad [\%] \quad (8)$$

一方 TPA では、パワーの次元に変形し、次式で寄与率 C_{psp} を定義する。

$$C_{psp} = \frac{H_{pk} F_k' F_k'}{H_{p1} F_1' F_1' + \dots + H_{pk} F_k' F_k'} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

ここで、位相情報を有していない SEA と比較するため、式(9)の評価点における応答 H_{pk} は、振幅の大きさのみで表わす。

これにより、式(7)、(8)で示す SEA は要素間における入力要素から評価要素への寄与率、式(9)で示す TPA は入力点から評価点への寄与率として両手法の比較が可能となる。

3. 音場を評価対象とした場合の両手法を比較する評価法の提案

3・1 振動入力による音場の応答予測と評価音場への伝達寄与率について

SEA では、式(1)の SEA 基礎式から音場のエネルギーを予測することができる。一方 TPA は 2.2 節で示した式(5)の分母より評価点の音圧を予測することができるが、SEA と比較するため、構造入力パワーで正規化した評価点音場のエネルギー、力で除算した振動入力点の速度と同定した力 F_k' を掛け合わせるにより、評価点の音場エネルギーを定義すると伝達寄与率 C_{pap} は次式で表され、評価点の音場エネルギーは次式の分母で表される。

$$C_{pap} = \frac{\frac{E_a \times v_k}{P_k} \times F_k' \times F_k'}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{E_a \times v_k}{P_k} \times F_k' \times F_k' \right)} \times 100 \quad [\%] \quad (10)$$

ここで、 E_a は音場エネルギーで SEA と算出式は同じであるが、SEA が空間平均した音場エネルギーであるのに対して、式(10)の分母は評価点における音場のエネルギーである。よって SEA は、空間平均した要素の音場エネルギーを表わし、式(10)の分母で表わす TPA は評価点の音場エネルギーとして、両手法の比較が可能となる。伝達寄与率は、SEA ではこれまで構造場で提案している式(7)、(8)で示す要素間でのパワーフローの割合として伝達寄与率を定義する。TPA は、式(10)より入力点から音場の評価点への寄与率として両手法の比較が可能となる。

4. 数値解析による評価法の検証

4・1 対象構造物と解析内容

本節では提案法を適用するための基礎検討として、7 要素の板構造物に囲まれた 1 要素の内部空間（体積は 2.52 m³）を持つ簡易な自動車構造を模擬した図 1 で示す単純構造を対象とする。パネルの板厚は 0.8 mm である。板モデルの材料特性は、ヤング率 2.1×10^{11} Pa、密度 7800 kg/m³、ポアソン比 0.3125 とする。図中の # は要素番号を示し、要素 7 の四隅を固定支持とする。

図1中の矢印は入力位置(要素辺り1点),○は応答位置(要素辺り5点)である。図1は実稼動試験を示しており,要素1と7に入力があることを示している。要素8の音場の応答位置は,図1で示すO点を原点とすると,ランダムに選択した4点とドライバーの耳位置付近(0.04, 0.14, 0.18)の計5点である。また,音場の入力位置は,(0.55, 1.0, 0)で音場の下面の表面の位置であり,拡散場1Paの入力である。それぞれの手法で評価する入力と応答の位置と個数は,モデル構築と実稼動試験について,原則SEAとTPAで同じであるが,TPAには音場側の入力は存在しない。また,加振源からの伝達寄与について,TPAのモデル構築における出力評価点は,ドライバー耳位置の1点のみを用いる。解析対象周波数は16 Hzから500 Hzまでの1/3オクターブ帯域とする。モデルに与える損失係数は,周波数に関係なく構造要素と音場要素ともに3%とした。

本研究ではモデル構築と実稼動試験をPAM-VAOne2010.5で求め(各節点の応答結果は構造場が速度と音場が音圧で大きさと位相で出力される),諸計算にMATLABを使用する。また,モデル構築と実稼動試験ともに構造場への加振入力単位入力(1N)を与える。実稼動試験における加振入力は要素に関わらず同位相の単位入力とする。

4・2 解析結果と考察

まずモード解析を行った結果,構造場の1次の固有振動数は2 Hzであり,100 Hzまでに370個のモードが存在した。音場の1次の固有振動数は89 Hzであり,その後,144, 159, 170, 173, 196 Hzにある。さらに,500 Hzまでに43個のモードが存在した。逆行列法のTPAによる式(3)より同定した入力は,要素1と7の全ての周波数域において単位入力の結果が得られモデルの有効性が示された。一方,モデル構築による同定したSEAの損失率の結果においては,式(7)より寄与率を算出する際に必要な要素1と要素8,要素7と要素8において,負の損失率がありTPAとの結果を比較することが不可能な周波数が見られた。本報におけるこの現象は,対象構造物の大きさに対して,応答点数が少ないために起こったものと思われる。そこで,結合損失率が正の値となるLalorが提案した⁽⁵⁾隣接要素のみを考慮する近似的パワー注入法(approximated power injection method: 以下APIM)の結果も併記することとした。

4・2・1 振動入力による音場の応答予測について

実稼動時の構造入力パワーで正規化した音場のエネルギー結果を図2に示す。上述したように音場の1次の固有振動数は89 Hzであるが,参考までに16 Hzからの結果を示す。PIMではフルマトリクスから損失率を算出しており,音場エネルギーを式(1)より $E=1/\omega L^1 P$ のように逆算して求める際にも安定した解が得られていると考えられる。しかし,APIMは音場モードの無い80 Hz程度までPIMとも大きく結果が異なっており,PIMと比較して簡易に結合損失率を求めることは可能であるが,損失率がフルマトリクスから算出されるわけではないため,予測精度が良好で無いものと思われる。音場のモードがある周波数においては,空間平均したSEAと評価点の結果であるTPAは定性的には概ね一致していることが確認できる。しかし3次元空間である音場では,定量的な比較は難しいと言える。

4・2・2 加振源から評価音場への伝達寄与率について

加振源から評価音場への寄与率の結果を図3(a), (b)に示す。凡例の白抜き丸で示したものが式(8)による損失率を使用せずに算出した結果である。前項と同じように,参考までに16 Hzからの結果を示す。図3(a), (b)よりAPIMの結果はTPAの結果と比較が可能ではあるが,PIMの結果は損失率が負の値を示しており,伝達寄与が100%内に収束していない。またモードのある100 Hz以上においても定性的に一致している箇所も少なく,両手法を比較することは難しいと言える。よって,音場を対象とした場合には,APIMによる評価もしくは式(8)による評価が

Fig.1 Test structure, including excitation (arrow), response (circles) of each subsystem.

Fig.2 Comparison between SEA and TPA normalized sound energy.

(a) Contribution rates from subsystem 1 to subsystem 8

(b) Contribution rates from subsystem 7 to subsystem 8

Fig.3 Comparison between SEA and TPA Contribution rates.

有効である。TPA では比較的要素 1 の寄与率が大きく表れている。これは、評価点であるドライバーの耳位置が要素 7 に比べて要素 1 に近い箇所にあるためであると思われる。

5. 結 言

本報では、車の内部音響空間を模擬した簡易な板構造物を対象に、その内部音場を評価対象とした場合の SEA と逆行列 TPA による比較評価方法を提案し、その有効性を数値解析により検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 振動入力による音場の応答予測について、新たに逆行列 TPA で提案した方法により両手法の比較は可能であり、定性的な一致が見られた。しかし、2 次元の振動場に対して 3 次元の音場では、応答点位置の影響が大きく表れるため、定量的な比較を行うことは難しいことが判明した。

(2) 加振源から評価音場への伝達寄与率について、従来 SEA で提案した方法は音場を対象とした場合にも有効であることがわかった。新たに逆行列 TPA で提案した方法により両手法の比較は可能ではあるが、結果は大きく異なっており、更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、(公財) JKA の競輪の補助 (25-101) により助成を受けたものであり、ここに謝意を表する。

文 献

- (1) David Copley, D. W. Herrin, Harvind Raman, and Jiantie Zhen, "Obtaining Structure-Borne Input Power for a SEA Model of an Earthmoving Machine Cab", *SAE Technical Paper*, 2011, doi:10.4271/2011-01-1732.
- (2) 黒田勝彦, 山崎徹, "SEA と TPA による機械構造物の入力パワーと伝達寄与に関する一考察", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 799 (2013), pp. 495-506.
- (3) 黒田勝彦, "エネルギー解析と伝達経路解析による薄板フレーム構造物の入力パワーと寄与率の比較検討", 長崎総合科学大学紀要, Vol. 53, (2013), pp. 17-24.
- (4) Lyon, R. H., "Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Application", *MIT Press*, (1975).
- (5) N.Lalor, "ISVR Technical Report", No.182, (1990).