

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

次に、この SEA モデルで解析するうえで重要な SEA パラメータ(内部損失率, 結合損失率)の求め方について述べる。

2.2. SEA パラメータ実験的な求め方

(1)内部損失率の求め方

内部損失率は、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。

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

(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} の関係式は式(5)で表わされる。

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

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)式で表わされる。(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ことにより、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。

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

ここで E_{ij} は、要素 j に入力パワーを与えた時の要素 i のエネルギーを表す。(E_{ii} は要素 i に入力パワーを与えた時の要素 i のエネルギーを表す。) 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(7)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(8)において測定誤差の生じやすい微小項 $E_{ij}E_{ji}$

($E_{ii} \gg E_{ij}$) 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、式(3)に代入し SEA モデルを作成する。この SEA モデルを実験 SEA モデルという。

2.3. SEA パラメータ解析的な求め方

自動車に適用されている防音材の音響特性(透過率, 吸音率)から音響系の SEA パラメータである音場の内部損失率, 音場間結合損失率, 及び音場との構造間の結合損失率を求めることができる。防音材の透過率 τ_{ij} , 音場間の境界面の表面積 A , 音場の体積 V を用いて式(11)から音場間結合損失率を求める。

$$\eta_{ij} = \frac{Ac_0}{4\omega V_i} \tau_{ij} \quad (11)$$

同様に防音材の吸音率 α , 音場の表面積 A , 音場の体積 V を用いて式(12)から音場の内部損失率を求める。

$$\eta_i = \frac{Ac_0}{4\omega V_i} \alpha \quad (12)$$

ここで、空気中の音の速度を c_0 , 音の角速度 ω とする。音響と構造間の結合損失率は空気密度 ρ_0 , 音響放射効率 σ_{rad} , 面密度 m を用いて、式(13)から求める。

$$\eta_{ij} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega m} \sigma_{rad} \quad (13)$$

以上の方法により SEA パラメータを求めることができ、式(3)に代入し SEA モデルを作成する。この SEA モデルを解析 SEA モデルという。

3. 提案するソフトの概要

本論では、100~5000[Hz]間で 2 要素間の SEA 解析ソフトの開発を行った。まず、エネルギーを求めるのに必要なデータ(P_i , η_i , η_{ij} , τ_{ij} , α , A , V , c_0 , ρ_0 , σ_{rad} , m , M_{eqi} , V_i^2 , ω , 1wp(1 ワットパワー)加振の E)の数值を Excel に入力し、次に、2 要素を音場-音場間、構造-構造間、音場-構造間から選択し、最後に、判断条件を選択する。ここでは、比較対象とした音場-音場のフローチャートを Fig.2 に示す。

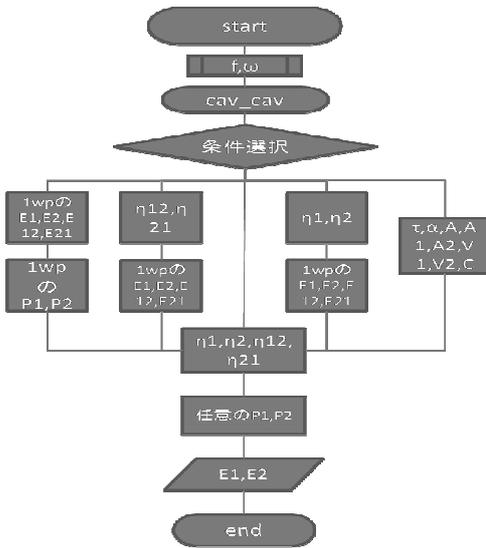


Fig.2 音場-音場のフローチャート

3.1. 音場-音場の場合

- ①DLF, CLF の両方が得られている
(3)式でエネルギーを計算
- ② DLF が得られている
(10)式で CLF 求め、(3)式でエネルギーを計算
- ③ CLF が得られている
(10)式で DLF を求め、(3)式でエネルギーを計算
- ④SEA パラメータを何も得られていない
(9)式で DLF, CLF を求め、(3)式でエネルギーを計算
- ⑤透過率, 吸音率が得られている
(11)式で CLF, (12)式で DLF を求め、(3)式でエネルギーを計算

ギーを計算

3.2. 構造-構造の場合

- ①~④音場-音場と同様
- ⑤等価質量と速度が得られている
(5)式でエネルギー比を求め、(9)式で DLF, CLF を求め、(3)式でエネルギーを計算

3.3. 音場-構造間の場合

- ①DLF, CLF の両方が得られている
音場-音場と同様
- ② DLF が得られている
(13)式で構造から音場の CLF を求め、(3)式でエネルギーを計算(音場から構造の CLF は無視)
- ③CLF が得られている
(10)式で構造の DLF を求め、(12)式で音場の DLF を求め、(3)式でエネルギーを計算
- ④SEA パラメータを何も得られていない
(9)式で DLF, CLF を求め、(3)式でエネルギーを計算
- ⑤等価質量と速度が得られている
(5)式でエネルギー比を求め、(9)式で DLF, CLF を求め、(3)式でエネルギー計算

4. ソフトの検証

本論は Matlab で作成した SEA 解析ソフトの妥当性を検証するために、一例として、本論で提案したソフトと SEA 解析を行える市販ソフトの VAI を用いて音場-音場の①条件でのエネルギー解析結果をそれぞれ比較した。

4.1. 入力条件

要素 1, 要素 2 への入力パワーを Fig.3 に示す。(実線: 要素 1 への入力パワー 点線: 要素 2 への入力パワー)

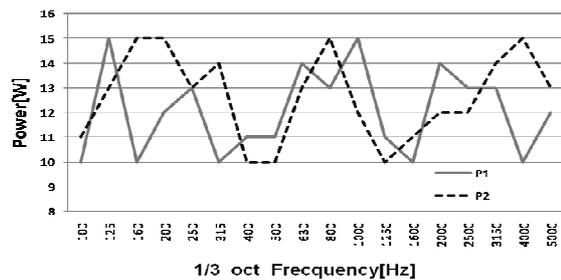


Fig.3 入力パワー

次に、要素1, 要素2のDLFをFig.4に示す。(実線：要素1のDLF 点線：要素2のDLF)

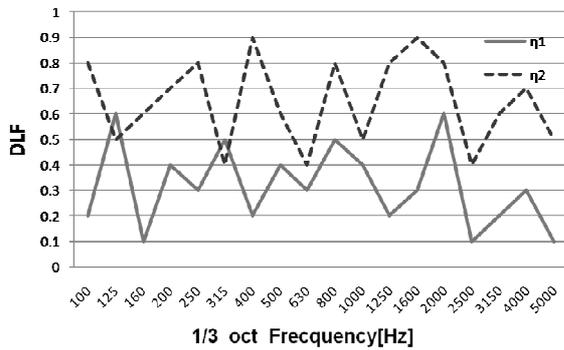


Fig.4 内部損失率

また、要素1から2, 要素2から1へのCLFをFig.5に示す。(実線：要素1から2へのCLF 点線：要素2から1へのCLF)

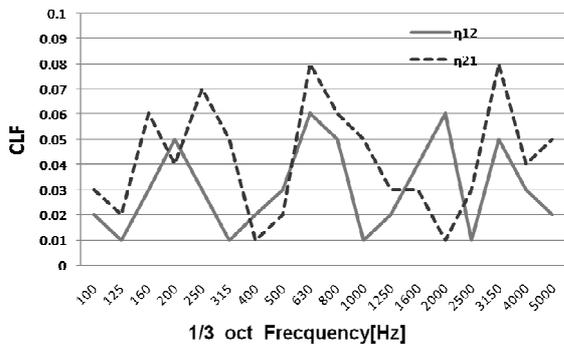


Fig.5 結合損失率

これらの入力条件をもとに、提案したソフトの検証を行った。

4.2. 検証結果

4.1の条件をもとに要素1, 要素2のエネルギーを、提案したソフトとVA1を用いて示す。その比較結果をFig.6, Fig.7に示す。

Fig.6は要素1のエネルギー, Fig.7は要素2のエネルギーを示す。

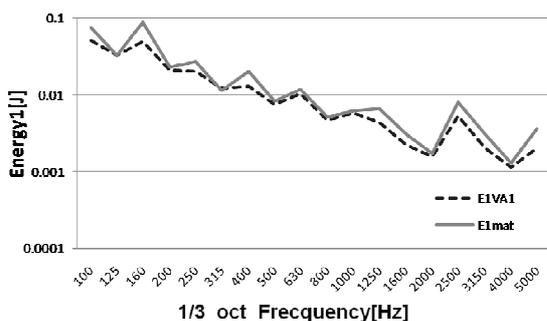


Fig.6 要素1のエネルギー

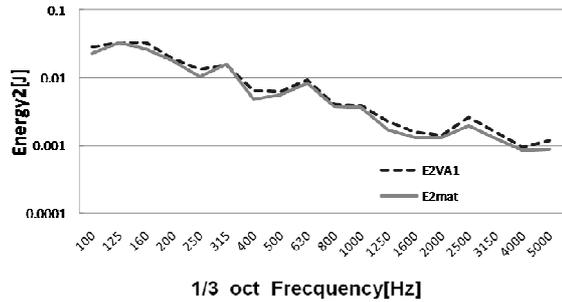


Fig.7 要素2のエネルギー

比較結果より提案したSEAソフトとVA1ソフトの解析結果がほぼ一致した。この結果から、今回提案したMatlabを用いたSEAソフトで、十分SEA解析を行えることがわかった。

5. 結論

Matlabで開発したSEA解析ソフトから以下のことがわかった。

- (1)提示したSEA解析ソフトにより、SEAソフトの考え方や計算手順を確認することができた。
- (2)以上の結果より、開発したSEA解析ソフトの妥当性が検証できた。

今後は、本論で開発した解析ソフトを基にn要素でのSEA解析ソフトの開発にも取り組んでいきたい。

⑨：本論は、見坐地研究室の学部3年生、蕨 俊宏君と共同で作成しました。

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,1999年自動車技術会学術講演会 No.71-99,9939730
- (2) 高橋亜佑美, 中根彰人, 橋上聡, 古株慎一, 見坐地一人：ハイブリッドSEA法による自動車の車室内音響解析,2010年春季大会自動車技術会学術講演会前刷集, No54-10,20105434