

非定常固体音の伝達パワーとエネルギーの平衡

Transmitted Power and Energy Balance of Transient Structure-Borne Sound

技術本部 本田 巖^{*1} 太田 和 秀^{*2}
長菱エンジニアリング株式会社 入江 良彦^{*3}

統計的エネルギー解析法による非定常固体音の計算法を提案する。定常な系におけるパワー平衡式が単純な連立方程式であるのに対し、非定常問題ではベクトル微分方程式となり、大規模な系ではその解析が問題となる。本手法は、非定常入力パワーを受ける場合、系のパワー平衡式が状態ベクトル方程式に対応することに着目し、これを遷移行列法を用いて解いている。要素のエネルギー応答時刻歴は要素数に対応した1次遅れ系の重ね合わせにより表現し、この結果を用いて、要素間の伝達パワーの計算式を導出した。非定常固体音の基本特性を把握するため、ステップ入力、インパルス入力及び残響特性の場合について、3要素系の計算例を示した。また、非定常固体音におけるエネルギー平衡条件について考察した。

Recently, with the increasing need for comfort in our living and working environments, there are problems in assessing structure-borne noise to transient input power in sense of time varying. These problems occur in office buildings condominiums ship's accommodation and are caused by railway vibrations, footfalls, water drainage, machines starting and stoping, etc. This paper propose a calculation method for transient structure-borne sound using the state vector analysis with SEA. The power balance equation of SEA is a nonstationary results, taking the time derivatives of element energy into account when the input power is transient. Taking the energy of each element as a state variable, it is formulated as a non-stationary power balance equation corresponding to a state vector differential equation in system theory. The solution of this state vector equation is giving by the transition matrix method using the Jordan standard form. As examples calculated by this method, the energy responses of 3-element systems subjected to step and the impulse input powers, and the reverberation process of the energy from the steady state are shown.

1. ま え が き

統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis, 以下SEA法と略記) は、音場・構造系の固体音解析手法としてその有効性が確認され、種々の製品の騒音予測に適用されつつある⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながら、これまでの適用は、定常入力に対する系の応答解析に限定されており、非定常入力を受ける場合の計算法に関する研究はほとんど見られない。この理由は、SEA法の実用的普及が十分でないこと、及び実用例の多くが定常問題の段階であることによる。

また、定常問題におけるパワー平衡式が単純な連立方程式であるのに対し、非定常問題ではベクトル微分方程式となり大規模系ではその解法が問題となる。

最近、固体音の研究進展及び快適性の要求に対応して、過渡的固体音の予測が注目されつつある。先に、筆者らはSEA法による非定常固体音の解析法を発表した⁽⁵⁾。この手法は要素エネルギーの非定常性を考慮した多要素系のパワー平衡式が状態ベクトル方程式に対応することに着目したものである。解としての要素エネルギーベクトルは、遷移行列法で表現され、方程式の係数行列はジョルダン標準形を用いて対角化している。

各要素のエネルギーは、系の要素数に対応した1次遅れ系の線形結合により表現される。3要素系の計算例では、入力要素と結合要素のエネルギー応答の時刻歴に大きな差が現れることを明らかにした。また、定常状態からの残響特性は、単純な指数関数としないことを示した。

本報告では、前報⁽⁶⁾に続き、3要素系について要素間の伝達パワーの計算及び非定常状態におけるエネルギー平衡について述べる。

2. 要素エネルギーの状態ベクトル解析⁽⁶⁾⁽⁷⁾

2.1 状態ベクトル方程式

要素数 n の系において、任意の要素 l が非定常入力パワー W_{0l} を受けるとき、中心周波数 ω の周波数バンドに関するパワー平衡方程式を行列形式で書くと、

$$\frac{d}{dt} \bar{E} + \omega Y \bar{E} = \bar{W}_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}^t &= \{E_1(t), E_2(t), \dots, E_l(t), \dots, E_n(t)\} \\ \bar{W}_0^t &= \{W_{01}(t), W_{02}(t), \dots, W_{0l}(t), \dots, W_{0n}(t)\} \end{aligned}$$

$$Y = [Y_{lk}] \quad l, k = 1, 2, \dots, n$$

$$Y_{ll} = \eta_l + \sum_k \eta_{lk} \quad Y_{lk} = -N_k \eta_{kl} \quad k \neq l$$

ここで、 N_l は要素 l について周波数バンド ($\omega, \Delta\omega$) 内に存在する固有モード数、 E_l 、 η_l は要素 l のエネルギー、及び内部損失率、 η_{lk} は要素 l から要素 k への結合損失率である。

要素のエネルギー $E_l(t)$ を状態量にとると、式(1)は状態ベクトル方程式そのものであり、次式のように書き直しておく。

$$\frac{d}{dt} \bar{E} = A \bar{E} + B \bar{W}_0 \quad (2)$$

$$A = -\omega Y, B = I \text{ (単位行列)}$$

出力ベクトルとして、要素間の伝達パワーベクトル $\bar{W}_c$ を作ると、

$$\bar{W}_c = C \bar{E} \quad (3)$$

$$\bar{W}_c^t = \{W_{12}(t), W_{13}(t), \dots, W_{lk}(t), \dots\}$$

$$C = \omega Y_c N D^t N^{-1} E \quad (4)$$

$$Y_c = [\text{diag.} \eta_{lk}], N = [\text{diag.} N_l]$$

ここで、 D は要素 l と k の結合状態を表す接続行列である。

*1 長崎研究所振動研究室

*2 長崎研究所振動研究室長 工博

*3 技師長 工博

2. 2 遷移行列法による解

式(2)の解ベクトル E は、方程式 $d\bar{E}/dt = A\bar{E}$ の遷移行列を $Q(t, \tau)$ とすると、次式になる。

$$\bar{E}(t) = Q(t, t_0)\bar{E}(t_0) + \int_{t_0}^t Q(t, \tau)B\bar{W}(\tau)d\tau \quad (5)$$

$$Q(t, \tau) = \exp\{A(t, \tau)\}$$

式(5)から、次式が得られる。

$t=0$ で、

$$E(t_0)=0 \text{ の場合: } \bar{E}(t) = \int_{t_0}^t Q(t, \tau)B\bar{W}_0(\tau)d\tau \quad (6)$$

$$\bar{W}_0(t)=0, E(t_0)=0 \text{ の場合: } \bar{E}(t) = Q(t, t_0)E(t_0) \quad (7)$$

式(5)の遷移行列の計算には、多要素系の解析において演算法が単純な Jordan 変換法を用いることにする。変換行列は特異値分解により求める。行列 A の固有値行列を Λ 、固有ベクトル行列を Φ とすると、

$$\exp(At) = \Phi \exp(Jt) \Phi^{-1} = \Phi \exp(\Lambda t) \Phi^{-1} \quad (8)$$

$$\Lambda = [\text{diag. } \lambda_i], \Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_n]$$

$$\Phi_i^t = \{\Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \dots, \Phi_{ik}, \dots, \Phi_{in}\}$$

ここで、 λ_i, Φ_i は、行列 A の i 次固有値及び固有ベクトルであり、 Φ_{ik} は要素 k の成分である。固有ベクトル行列 Φ は正規直交系であるから、 $\Phi^{-1} = \Phi^t$ が成立する。

したがって、遷移行列 $Q(t)$ は次式のように書ける。

$$Q(t) = \exp(At) = \Phi [\text{diag.} \exp(\lambda_i t)] \Phi^t = [Q_{lk}(t)] \quad (9)$$

$$Q_{lk}(t) = \sum_{i=1}^N \exp(\lambda_i t) \Phi_{il} \Phi_{ik} = \sum_{i=1}^N \beta_{ilk} \exp(\lambda_i t) \\ i, k, l = 1, 2, \dots, n$$

3. 伝達パワーの計算例

図1に、3要素系の計算モデルを示す。モデルの数値は次のとおりである。

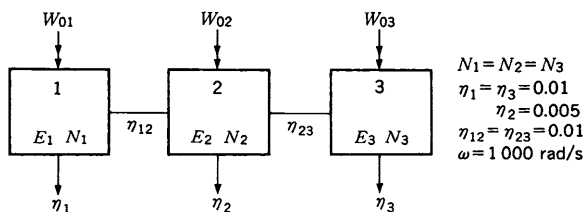
周波数バンドの中心周波数: $\omega = 1000 \text{ (rad/s)}$

要素のモード数: $N_1 = N_2 = N_3$

要素の内部損失率: $\eta_1 = \eta_3 = 0.01, \eta_2 = 0.005$

要素間の結合損失率: $\eta_{12} = \eta_{23} = 0.01$

結合損失率 η_{lk} について $N_l \eta_{lk} = N_k \eta_{kl}$ が成立する。ここでは、全要素のモード数 N_l は同一であるから $\eta_{lk} = \eta_{kl}$ となり、式(1)の損失率行列 Y は対称行列になる。



3. 1 行列 A の遷移行列

図1 3要素系モデル

Calculation model of 3-Element system

本報では、モード密度の等しい要素が直列に結合した系の要素1のみに入力がある場合について検討した。

計算モデルの数値を用いると、行列 A は次式となる。

$$A = -\omega Y \begin{bmatrix} -20 & 10 & 0 \\ 10 & -25 & 10 \\ 0 & 10 & -20 \end{bmatrix} \quad (10)$$

行列 A の固有値行列 λ_i と固有ベクトル行列 Φ は、

$$\lambda_1 = -8.138, \lambda_2 = -20.0, \lambda_3 = -36.86 \quad (11)$$

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3] = \begin{bmatrix} 0.5418 & 0.707 & 0.4545 \\ 0.6427 & 0 & -0.7667 \\ 0.5418 & -0.707 & 0.4545 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(9), (11), (12) から遷移行列 $Q(t) = \exp(At) = [Q_{lk}(t)]$ は、

$$Q_{lk}(t) = \sum_i \beta_{ilk} \exp(\lambda_i t) \quad i, k, l = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$[\beta_{1lk}] = \begin{bmatrix} 0.294 & 0.348 & 0.294 \\ 0.348 & 0.413 & 0.348 \\ 0.294 & 0.348 & 0.294 \end{bmatrix} \quad [\beta_{2lk}] = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$[\beta_{3lk}] = \begin{bmatrix} 0.207 & -0.348 & 0.207 \\ -0.348 & 0.587 & -0.348 \\ 0.207 & -0.348 & 0.207 \end{bmatrix}$$

3. 2 要素の非定常エネルギー応答と伝達パワー

要素のモード数は $N_1 = N_2 = N_3$ であるから、式(3), (4)を用いると伝達パワーは次式のように単純な表現式となる。

$$W_{lk}(t) = -W_{kl}(t) = \omega \eta_{lk} [E_l(t) - E_k(t)] \quad (14)$$

$$l = k = 1, 2, 3$$

すなわち、要素エネルギーの時刻歴応答が求まると、伝達パワーは結合要素のエネルギーの差に比例する。

3. 2. 1 要素1へのステップ入力の場合

入力パワーベクトル: $\bar{W}_0^t = \{W_{01}(t), 0, 0\}$

$$W_{01}(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (15)$$

要素1のエネルギー応答 $E_1(t)$ は、式(13), (15)を式(6)に代入すると、

$$E_1(t) = -\sum_i \gamma_{i1} \{1 - \exp(\lambda_i t)\} \quad \gamma_{i1} = \beta_{i11} / \lambda_i \quad l = 1, 2, 3 \quad (16)$$

図2及び図3に、各要素のエネルギー応答 $E_1(t)$ 及び要素間の伝達パワー $W_{12}(t), W_{23}(t)$ を示す。入力が作用する要素1のエネルギー応答は1次遅れ系のステップ応答に近い挙動を示している。

要素2, 3の応答は要素1と異なる傾向を示し、特に、応答の初期において顕著である。これは、要素1から要素2, 3へのエネルギー伝達の遅れに起因するものである。

伝達パワー $W_{12}(t)$ は、 $t=0$ から1次遅れ系の応答に近い形で増加し、最大値に到達した後、定常入力の場合の $t=\infty$ における伝達パワー $\omega \eta_{12} \{E_1(t) - E_2(t)\} = 0.334$ に収束する。 $W_{23}(t)$ は、要素2のエネルギー $E_2(t)$ が $W_{12}(t)$ によって規定されるために遅れが生ずる。

3. 2. 2 要素1へのインパルス入力の場合

入力パワーは、式(15)において、 $W_{01}(t) = \delta(t)$ となる。要素1のエネルギー応答 $E_1(t)$ は、式(16)の代わりに次式となる。

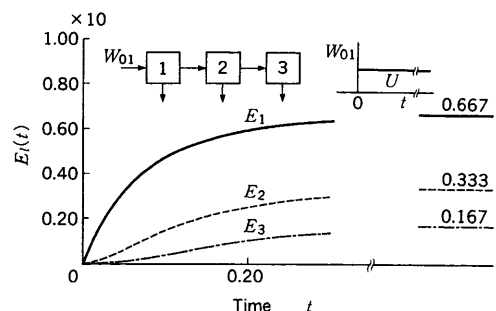


図2 ステップ入力に対するエネルギー応答

Time histories of energy response for step input

要素1のエネルギー応答は1次遅れ系のステップ応答に近い挙動を示す。また、要素2, 3は応答の初期において、要素1と著しく違った傾向を示す。

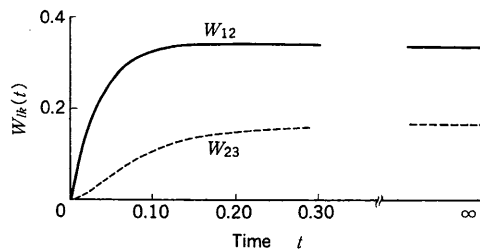


図3 ステップ入力における伝達パワー
Time histories transmitting power for step input
伝達パワー W_{12} は 1 次遅れ系の応答に近い形で増大し、最大値に到達した後に、定常入力の場合の伝達パワーに収束する。伝達パワー W_{23} は要素 2 のエネルギーレベルが伝達パワー W_{12} によって規定されるため遅れが生ずる。

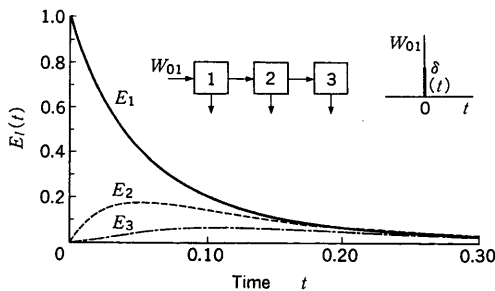


図4 インパルス入力に対するエネルギー応答
Time histories of energy response for impulse input
伝達パワーの結果から、要素のエネルギーは、まず、 $E_1(t)$ と $E_2(t)$ が平衡し、その後、全要素のエネルギーが平衡することが分かる。

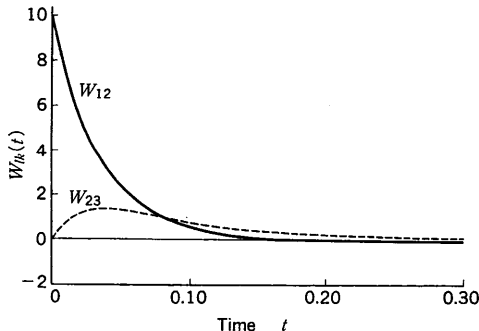


図5 インパルス入力における伝達パワー
Time histories of transmitting power for impulse input
 W_{12} は、要素 1 のエネルギーに対応して、単調にかつ急速に減少する。 W_{23} は、要素 2 のエネルギーの応答遅れにより、ある時刻から $W_{12}(t) < W_{23}(t)$ となるパワーフローの逆転現象が生ずる。

$$E_l(t) = \sum_i \beta_{il} \exp(\lambda_i t) \quad l=1, 2, 3 \quad (17)$$

式(14)に式(17)を代入して、3.2.1 項と同様に伝達パワー $W_{12}(t)$, $W_{23}(t)$ を求めると、

$$W_{12}(t) = 5.0 \exp(\lambda_1 t) - 0.54 \exp(\lambda_2 t) + 5.54 \exp(\lambda_3 t)$$

$$W_{23}(t) = 5.0 \exp(\lambda_1 t) - 0.54 \exp(\lambda_2 t) - 5.54 \exp(\lambda_3 t)$$

図4及び図5は、各要素のエネルギー応答 $E_l(t)$ 及び要素間の伝達パワー $W_{12}(t)$, $W_{23}(t)$ の計算結果である。 $W_{12}(t)$ は、要素 1 のエネルギーに対応して、単調かつ急速に減少する。 $W_{23}(t)$ は、要素 2 のエネルギー応答遅れにより、ある時刻から $W_{12}(t) < W_{23}(t)$ となるパワーフローの逆転現象が生ずる。伝達パワーの結果から、要素のエネルギーは、まず、 $E_1(t)$ と $E_2(t)$ が平衡し、

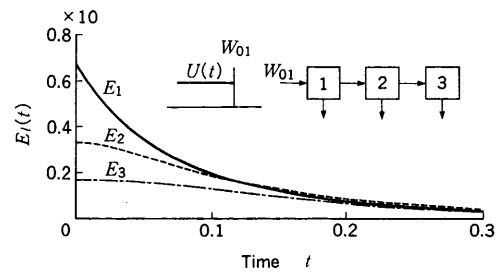


図6 残響特性
Time histories of energy response for reverberant process
インパルス入力の場合と同様に、要素 1 のエネルギー応答は要素 3 のエネルギー応答に漸近平衡し、その後全要素のエネルギーが平衡する。

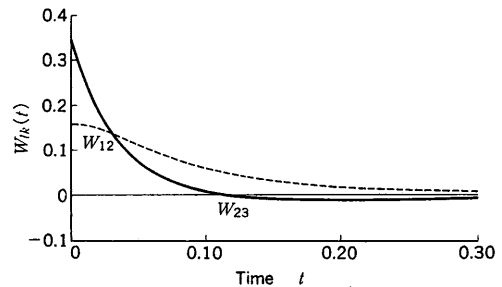


図7 残響特性における伝達パワー
Time histories of transmitting power reverberant process
 W_{12} は急速に減少するが、ある時刻から $W_{12} < 0$ となりエネルギーは要素 2 から 1 へ逆流することを示している。

その後、全要素のエネルギーが平衡することが分かる。

3. 2. 3 残 響 特 性

要素 1 への入力による全要素のエネルギーが定常状態に達した後、入力パワーを遮断し各要素のエネルギーが減衰するときの要素間の伝達パワーを求める。

$t=0$ における各要素のエネルギーは、ステップ入力の場合の $t=\infty$ におけるエネルギーに対応し次式となる。

$$E_1(0) = 0.067 \quad E_2(0) = 0.033 \quad E_3(0) = 0.017 \quad (18)$$

この場合、要素 1 のエネルギー応答 $E_1(t)$ は式(7)から

$$E_l(t) = \sum_i \sum_k E_k(0) \beta_{il} \exp(\lambda_i t) \quad i, l, k=1, 2, 3 \quad (19)$$

式(14)に式(19)を代入し、式(18)の要素エネルギーの初期値 $E_k(0)$ を用いると、残響状態における伝達パワー $W_{12}(t)$, $W_{23}(t)$ は、

$$W_{12}(t) = 0.25 \exp(\lambda_1 t) - 0.067 \exp(\lambda_2 t) + 0.152 \exp(\lambda_3 t)$$

$$W_{23}(t) = 0.25 \exp(\lambda_1 t) + 0.067 \exp(\lambda_2 t) - 0.152 \exp(\lambda_3 t)$$

図6に残響時の各要素のエネルギー応答 $E_l(t)$ を、図7には要素間の伝達パワー $W_{12}(t)$, $W_{23}(t)$ を示す。

$W_{12}(t)$ は、急速に減少するが、ある時刻から $W_{12}(t) < 0$ となりエネルギーは要素 2 から 1 へ逆流することを示している。これは、内部損失率が $\eta_2 < \eta_1$ であることによると考えられる。 $t \rightarrow \infty$ では、 $W_{12}(t) \rightarrow 0$ に収束する。また、インパルス入力の場合と同様に、要素 1 のエネルギー応答は要素 3 のエネルギー応答に漸近平衡し、その後全要素のエネルギーが平衡する。

$t=0$ においては、 $E_1(0) > E_2(0) > E_3(0)$, $W_{12}(t) > W_{23}(t)$ であるが、ある時刻から $W_{12}(t) < W_{23}(t)$ となる。これは、 $E_1(t) > E_2(t) > E_3(t)$ であるため要素 3 へエネルギーが流れ続け、 $\{E_1(t) - E_2(t)\} < \{E_2(t) - E_3(t)\}$ となることによる。

4. 非定常固体音のエネルギー平衡

定常問題では、入力パワーの合計と消散パワーの合計の間に平

平衡条件が成立する。非定常の場合は、この条件が成立しない。これは、入力パワーの時間経歴に対して応答エネルギーに時間遅れが生じるためである。ここでは、非定常応答における系のエネルギー平衡を考察する。

4.1 エネルギー平衡式の導出

時刻 t における要素 l のパワー平衡式は、次式である。

$$\frac{d}{dt} E_l(t) + \omega \eta_l E_l(t) + \omega \sum_k \eta_{lk} E_l(t) - \omega \sum_k \eta_{kl} E_k(t) = W_{0l}(t) \quad (20)$$

式(20)の左辺第3, 4項の伝達パワーを要素のモーダルエネルギーで表現し、全要素について合計すると、次式が成立する。

$$\omega \sum_l \sum_k \eta_{lk} N_l e_l(t) - \omega \sum_l \sum_k \eta_{kl} N_k e_k(t) = 0 \quad (21)$$

ここで、 e_l , N_l は、要素 l の平均モーダルエネルギー及びモード数である。したがって、時刻 t における系のパワー平衡式は、

$$\sum_l \frac{d}{dt} E_l(t) + \omega \sum_l \eta_l E_l(t) = \sum_l W_{0l}(t) \quad (22)$$

式(22)を時間区間 $[0, t]$ で積分すると、非定常入力を受ける系のエネルギー平衡式が次式のように求まる。

$$\sum_l E_l(t) + \omega \sum_l \eta_l \int_0^t E_l(\tau) d\tau = \sum_l E_l(0) + \sum_l \int_0^t W_{0l}(\tau) d\tau \quad (23)$$

ここで、左辺第1項は時刻 t における全要素のエネルギー $E_s(t)$ 、左辺及び右辺の第2項は、それぞれ時刻 t までの系の全消散エネルギー $E_d(t)$ 及び全入力エネルギー $E_0(t)$ である。

すなわち、非定常入力の場合、時刻 t までの入力エネルギーは、時刻 t までの消散エネルギーと時刻 t における要素のエネルギー $E_s(t)$ の合計と平衡する。これは、入力パワーの時間経歴に対する要素のエネルギー応答の遅れにより、消散パワーにも遅れが生じて要素のエネルギーとして残存することを意味する。

4.2 エネルギー平衡の計算式と検証

ここでは、ステップ入力、インパルス入力及び残響特性の場合について、3.2節に示した要素エネルギーの式から系のエネルギー平衡式を導く。また、伝達パワーと同一入力条件において、3要素系により検証する。

4.2.1 ステップ入力の場合

入力パワー : $W_{0k}(t) = U_k(t) \quad k=1, 2, 3, \dots, n$

要素1のエネルギー : $E_1(t) = -\sum_l \sum_k \gamma_{1lk} [1 - \exp(\lambda_l t)]$

全要素のエネルギー : $E_s(t) = -\sum_l \sum_k \gamma_{1lk} [1 - \exp(\lambda_l t)]$ (24)

全要素の消散エネルギー :

$$E_d(t) = -\omega \sum_l \sum_k \eta_l \gamma_{1lk} [t + \{1 - \exp(\lambda_l t)\} / \lambda_l] \quad (25)$$

全入力エネルギー : $E_0(t) = \sum_k U_k t \quad U_k=1.0$ (26)

いま、3.3.1項と同じく、要素1への入力を考え、前述の3要素モデルの数値を用いると、 $E_s(t)$, $E_d(t)$, $E_0(t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} E_s(t) &= 0.117 - 0.115 \exp(\lambda_1 t) - 0.0018 \exp(\lambda_3 t) \\ E_d(t) &= -0.117 + 1.00 t + 0.115 \exp(\lambda_1 t) \\ &\quad + 0.00177 \exp(\lambda_3 t) \end{aligned} \quad (27)$$

$$E_0(t) = 1.00 t \doteq E_s(t) + E_d(t)$$

式(27)から、エネルギー平衡式(23)が検証されたことが分かる。

4.2.2 インパルス入力の場合

入力パワー : $W_{0k}(t) = \delta_k(t) \quad k=1, 2, 3, \dots, n$

要素1のエネルギー : $E_1(t) = -\sum_l \sum_k \beta_{1lk} \exp(\lambda_l t) \quad i, l=1, 2, 3$

全要素のエネルギー : $E_s(t) = -\sum_l \sum_k \beta_{1lk} \exp(\lambda_l t)$ (28)

全要素の消散エネルギー :

$$E_d(t) = -\omega \sum_l \sum_k \eta_l \gamma_{1lk} [1 - \exp(\lambda_l t)] \quad (29)$$

全入力エネルギー : $E_0(t) = \sum_k U_k(t) \quad U_k=1.0$ (30)

同様に、3要素モデルの数値を用いると、 $E_s(t)$, $E_d(t)$, $E_0(t)$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} E_s(t) &= 0.936 \exp(\lambda_1 t) + 0.066 \exp(\lambda_3 t) \\ E_d(t) &= 1.00 - 0.936 \exp(\lambda_1 t) - 0.0652 \exp(\lambda_3 t) \\ E_0(t) &= 1.00 \doteq E_s(t) + E_d(t) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

インパルス入力の場合も、エネルギー平衡式(23)が成立している。

4.2.3 残響特性の場合

入力パワー : $W_{0k}(t) = 0$

要素 l のエネルギー :

$$E_l(t) = -\sum_k E_k(0) \beta_{ilk} \exp(\lambda_i t) \quad i, l=1, 2, 3$$

要素 k のエネルギーの初期値 : $E_k(t) = E_k(0) \quad t=0$

全要素のエネルギー : $E_s(t) = -\sum_i \sum_l \sum_k E_k(0) \beta_{ilk} \exp(\lambda_i t)$ (32)

全要素の消散エネルギー :

$$E_d(t) = -\omega \sum_l \sum_k \eta_l \gamma_{ilk} \{1 - \exp(\lambda_i t)\} \quad (33)$$

全入力エネルギー : $E_0(t) = \sum_k E_k(0)$ (34)

要素 k のエネルギーの初期値 $E_k(0)$ は、ステップ入力における $t=\infty$ での要素のエネルギーに対応し、次のように与えられる。

$$E_1(0) = 0.0667 \quad E_2(0) = 0.0333 \quad E_3(0) = 0.0167 \quad (35)$$

式(32), (33), (34) に3要素モデルの数値と要素のエネルギー初期値 $E_k(0)$ に式(35)を用いると、

$$\left. \begin{aligned} E_s(t) &= 0.115 \exp(\lambda_1 t) + 0.00158 \exp(\lambda_3 t) \\ E_d(t) &= 0.11698 - 0.115 \exp(\lambda_1 t) - 0.001765 \exp(\lambda_3 t) \\ E_0(t) &= 0.1167 \doteq E_s(t) + E_d(t) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

式(36)から分かるように、残響時においてもエネルギー平衡式(23)が成立している。

5. ま と め

SEA法による多要素系の非定常固体音計算法として、要素のエネルギーを状態量とした、状態ベクトル微分方程式による計算手法を提案した。求められた要素エネルギーから要素間の伝達パワーの計算法を述べた。入力条件が、ステップ入力パワー、インパルス入力パワー及び定常状態からの入力遮断の場合について、3要素系の計算例を各要素のエネルギー応答と対応させて示した。入力要素に直結された要素と間接的に結合された要素では、エネルギー応答の遅れが異なる。これは、それぞれの要素間の伝達パワーの時間履歴に直接的に影響し、要素の内部損失率、要素の結合関係及び結合損失率により決定される。

また、定常問題におけるパワー平衡に代わるものとして、非定常応答におけるエネルギー平衡条件式を示した。これは、入力エネルギーが、消散エネルギーと系の保有エネルギーの合計に平衡する表現式となる。伝達パワー計算に用いた3要素系について、エネルギー平衡式が成立することを検証した。

参 考 文 献

- (1) L. Cremer, M. Heckl, E. E. Ungar, Structure Borne Sound, Springer Verlag (1973)
- (2) R. H. Lyon, Statistical Energy Analysis in Dynamical Systems-Theory and Applications, MIT Press (1975)
- (3) 入江, 中村, SEA法による固体音伝搬解析, 日本船舶機関学会誌 19 (3) p.257-266 (1984-3)
- (4) 入江, 本田, 船舶の騒音予測, 日本音響学会講演論文集 2-3 -14 p.613-616 (1992-3)
- (5) 本田, 入江, SEA法による非定常固体音の解析, 信学技報 EA 94-61 (1994-11)