揺らぎの確率情報に整合した外来雑音下の システム同定と遮音システム

正 員 太 田 光 雄 (広島大)

正 員 生 田 顕 (広島大)

正 員 肖 業 貴 (広島大)

A System Identification Method Matched to the Probability Distribution Information of Fluctuation under Existence of External Noise and Sound Insulation System

Mitsuo Ohta, Member (Hiroshima Akira Ikuta, Member Yegui Xiao, Member (Hiroshima University)

As is well-known, most of conventional studies on the sound insulation system were introduced mainly from the deterministic viewpoint in a frequency domain or based on the linear correlation technique in a time domain. However, in the actual noise environment, the resultant signal often shows a complicated fluctuation pattern apart from the usual Gaussian type, owing to the variety of phenomena and the complexity of human response, and the actual observation is inevitably contaminated very often by a background noise of arbitrary distribution type. Therefore, in this paper, an identification method of arbitrary sound insulation systems contaminated by a background noise is proposed, under the evaluation criterion based on the agreement between theory and experiment for the output probability distribution, especially by paying our attention to not only the lower order statistical information like mean and variance but also the higher order statistical one which is directly matched to the actual noise evaluation indices L_X ($X=95, 90, 10, 5$). Concretely, these systems are first described in a non-linear equation on the power flow in a time domain. Then, by newly introducing an error criterion on the deviation from the actually observed output probability distribution, a recurrence estimation algorithm for system parameter is introduced from three different viewpoints by use of the well-known stochastic approximation method. Finally, the effectiveness of our proposed method is confirmed experimentally by applying it to the non-parallel type double wall and sound-bridge type shielding systems which are very difficult to evaluate by the already-known theoretical analyses.

キーワード：システム同定，確率分布情報，外来雑音，遮音システム，応答分布予測

1. ま え が き

環境騒音分野では，自然，社会的要因はもちろん，人間まで介入し，考察対象とする実システムも極めて複雑な場合が多い。しかも暗騒音の混入するのが通常

である。そのうえ，システムの入出力および暗騒音は不規則に変動して標準ガウス分布から外れた多様な揺らぎの確率分布形状を示す。このような状況下において，対象とするシステムを何らかの形で同定したり，その出力応答を平均のみならず，分布全体に直結した

$L_x((100-X)\%$ レベル)など騒音評価量との関連から、ときに揺らぎ分布全体において、確率分布情報の多様性を失うことなく予想せねばならぬことがしばしばある。

いまさら取上げるまでもなく、システム同定や応答分布の予測法には様々な決定論または確率論的方法が多く見いだされている¹⁾。しかし、その手法のほとんどは、入出力がもつ複雑多様な揺らぎの確率分布情報へ整合させるよりは、どちらかと言えば、ハードなシステム構成のほうにまず目を向けている。すなわち、システムのモデル化やそのパラメータ同定に際し、標準路線に沿い、出力の確率変動情報として平均、分散、線形相関など平滑化された低次モーメント情報のみを利用することが多い。しかも、同定・予測の方法論としても簡便さや標準化を目指し、標準ガウス分布を基幹として最小自乗法、最じょう法などの公式路線に沿うのが通常である。

しかし、システム同定の公式路線に寄添うのではなく、同定の主目的が単に平均においてでなく、音環境における L_x 評価量など出力応答の分布形状全体においてその揺らぎ情報の多様性をも予測したいのであれば、当然、よく知られた標準的な手法のみを直接採用することには問題が生ずる。すなわち、分布予測といった問題への整合性を特に重視した、新たな目的指向形の同定・予測手法を見いださねばなるまい。

本研究ではこのような背景から、特に応答の確率分布情報を基盤にした、遮音システムの一定同定法について考察を行っている。具体的には、平均、分散、線形相関といった平滑化された低次モーメント情報のみを利用するのではなく、また最小自乗法など同定のため的人為的評価規範をあらかじめ導入するのでもなく、非ガウス形の複雑な確率分布形状に整合させ応答の全揺らぎ情報を利用する新たな同定手法を提案する。その具体化に際しては、遮音システムに対する入出力の時系列観測データから、出力分布を予測する目的論的な立場に整合させて、時間経過の姿におけるシステム同定を行った。最後に、各種遮音システムでの実験データに適用して本理論の有効性を実験的にも検討を加えている。

2. 理論的考察

〈2・1〉 遮音システムのモデル化 暗騒音混入下における各種遮音壁の入出力関係を一般的に次のような多入力ー出力の非線形システムで表す。すなわち、何らかの物理構造に基づいて構築するか、もしくは振舞いの機能的立場から次のモデルをまず与える。

$$y_k = F(x_k, v_k, a) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 x_k, y_k は音の強さまたはそのデシベル値で、それぞれ任意遮音壁に対する N 次元入力騒音ベクトルおよび出力スカラ観測値、 a はシステムの M 次元未知パラメータベクトル、 v_k は任意の変動分布を示す L 次元暗騒音ベクトルであり、 $F(\cdot)$ はエネルギー加算則など種々の物理法則に支えられた既知の非線形関数である。また、離散値の添字 k は、時間領域・周波数領域など研究対象により適宜、採用して流通させるものとする。ここで、入力騒音 x_k と暗騒音 v_k は通常、音源が異なっていることから互いに統計的に独立である。 v_k の統計量は既知とし、 x_k と y_k の観測データに基づきパラメータ a を逐次推定してゆくものとする。

〈2・2〉 応答分布の階層表現に基づく遮音システムの同定 (一般理論) 本研究では、公知の最小自乗法など操作的評価規範をあらかじめ導入することなく、実現現象がもつ多様な揺らぎ分布情報の全体に推定の足場をまず置く。すなわち、実際に出力 y_k を観測してあらかじめ得た確率分布を $P_R(y_k)$ とし、入力情報と暗騒音の統計情報および未知パラメータの推定値 $\hat{a}$ を用いて (1) 式のシステムモデルから理論的に構築した出力の確率分布を $P(y_k)$ で表す。まず $P(y_k)$ を次のごとく $P_R(y_k)$ を基幹にした統計的な直交級数展開で表しておく。

$$P(y_k) = P_R(y_k) \sum_{n=0}^{\infty} A_n \theta_n(y_k), \quad A_n = \langle \theta_n(y_k) \rangle \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\theta_n(y_k)$ は $P_R(y_k)$ を重みとする正規直交関数で、次式を満足する。

$$\int \theta_m(y_k) \theta_n(y_k) P_R(y_k) dy_k = \delta_{mn} \dots\dots\dots (3)$$

このとき、 $P(y_k)$ と $P_R(y_k)$ とのずれは自然に $\epsilon(y_k) \triangleq \{P(y_k) - P_R(y_k)\} / P_R(y_k)$ で定義されるから、(2) 式より直ちに次式を得る。

$$\epsilon(y_k) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \theta_n(y_k) \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、与えられた入力情報のもとでシステムモデルから推定した理論分布 $P(y_k)$ が実際の確率分布 $P_R(y_k)$ に等しいとき $\epsilon(y_k) = 0$ になるとして、(4) 式に (1) 式の関係代入する。すなわち、 $P(y_k)$ と $P_R(y_k)$ を合致させる評価規範に従ってシステムパラメータ a を推定することが可能となる。実用的には、階層的表現をもつこの一般的な誤差評価尺度 $\epsilon(y_k) = 0$ を工学的要求に照らして我々がどのような階層水準で利用するかにより、以下に示す種々の評価法が考え

られる。

(1) 部分的評価法 (4)式の階層表現 $\epsilon(y_k) = 0$ が恒等的に成立するためには、すべての $n > 0$ に対して $A_n = 0$ が満たされなければならない。しかし、実際には妥協としてある特定または幾つかの n に限定して(4)式を誤差評価に用いねばならず、実用的見地からはできる限り小数個を選ぶのが得策である。工学的な許容幅や真値のどの部分をどれだけきめ細かく推定したいのか、もともと、こういった実用性は真理性の犠牲と工学的要求の妥協において決めなければならない。すなわち、 $\epsilon(y_k) = 0$ に対応する部分的評価法として、有限個の n を選んで次のパラメータ評価基準を設定する。

$$A_n = \langle \theta_n(F(x_k, v_k, a)) \rangle = 0 \quad (5)$$

n の選び方として、もし小さい値をとれば、低次モーメント情報に基づいて変動分布の中央付近を重視することになり、大きい値をとれば、高次モーメント情報をも重視して変動分布の端と強く結び付く評価法となる。

(2) 総合的評価法 あらかじめ実際に入手した出力の確率分布情報を基に $P_R(y_k)$ からのずれを平均形態ではあるが総合的に評価する一方法として $\langle \epsilon^2(y_k) \rangle$ をパラメータ推定のための誤差評価基準として採用し、これを最小にするようにパラメータ a を推定することもできる。すなわち、(2)~(4)式より

$$\begin{aligned} \langle \epsilon^2(y_k) \rangle &= \int \left\{ \sum_{n \neq 0} A_n \theta_n(y_k) \right\}^2 P_R(y_k) dy_k \\ &= \sum_{m \neq 0} \sum_{n \neq 0} A_m A_n \int \theta_m(y_k) \theta_n(y_k) P_R(y_k) dy_k \\ &= \sum_{n \neq 0} A_n^2 \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

となることから、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a} \left(\sum_{n \neq 0} A_n^2 \right) &= \frac{\partial}{\partial a} \left[\sum_{n \neq 0} \langle \theta_n(F(x_k, v_k, a)) \rangle^2 \right] \\ &= 0 \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

を満足するようにパラメータ a を推定する。

(3) (1)と(2)の組合せによる評価法 特定部分と全体の平均的形態を同時に重視する評価法として、幾つかの n 値に対する(5)式と(7)式を組合せて連立方程式を作ることにより、(1)と(2)を適宜組合せた評価法のもとにパラメータ a の推定を行う。

〈2・3〉 時系列モデルによる推定アルゴリズムの具体化 環境騒音の評価や規制において、平均・分散・ L_{eq} といった低次モーメント統計量はもちろん、変動の分布形状全体に直結した L_x ($X=95, 90, 50, 10, 5, \dots$) 評価量など、様々な確率的評価法が提案されているのは公知のとおりである。従って、騒音レベ

ル分布がもともと、あるレベル以下に滞在する時間的割合で定義されることから、本研究では通常の分析的立場に立つ周波数域での考察よりも、どちらかと言えば総合的見地に立つ時間領域でのエネルギー変動のほうにまず目を向ける。特に本論文ではレベル分布予測といった研究目的に少しでも整合させるべく、時系列モデルにより遮音システムのパラメータ同定に関するアルゴリズムを具体化する。

すなわち、特にエネルギー変量に着目するとき、公知の S.E.A. 法⁽²⁾⁽³⁾にも支えられて、任意遮音システムは次のような線形システムとして表され得る。

$$y_k = \sum_{i=0}^l a_i x_{k-i} + v_k \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 x_{k-i} , y_k はそれぞれ $k-i$ 時刻における入力騒音パワーおよび k 時刻における透過出力騒音パワーであり、 l は時系列モデルの次数である。また、デシベル値での観測に整合のとれた、次のモデル化も可能である。

$$Y_k = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=0}^l a_i 10^{(X_{k-i})/10} + 10^{V_k/10} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 X_{k-i} , Y_k , V_k はデシベル変量での入力、出力、および暗騒音の時系列データを表している。

まず、実際に入手した出力 y_k の確率分布情報 $P_R(y_k)$ に対して、非ガウス形の任意分布に対処可能なグラムシャリエ A 形級数表現をあらかじめ採用する：

$$\begin{aligned} P_R(y_k) &= N(y_k; \mu_y, \sigma_y) \left\{ 1 + \sum_{n=3}^{\infty} \alpha_n \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n \left(\frac{y_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right\} \\ N(y_k; \mu_y, \sigma_y) &\triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \exp \left\{ -\frac{(y_k - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right\} \\ \mu_y &\triangleq \langle y_k \rangle, \quad \sigma_y^2 \triangleq \langle (y_k - \mu_y)^2 \rangle \\ \alpha_n &\triangleq \left\langle \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n \left(\frac{y_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right\rangle \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、上式における期待値演算 $\langle \cdot \rangle$ は y_k のエルゴード性より時間平均により算定されるものとする。このとき、(3)式を満足する正規直交多項式 $\theta_n(y_k)$ を構成するための一次独立な多項式系列には、次のごとくエルミート多項式が採用できる。

$$\theta_n(y_k) = \sum_{j=0}^n \lambda_{nj} \frac{1}{\sqrt{j!}} H_j \left(\frac{y_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 λ_{nj} はシエミットの直交化法を用いて算定される係数で y_k の統計量が反映されている (頁数の制限のため結果のみを付録に示す)。

(8)式の時系列モデルに対し、(5)式は暗騒音の統

計量を浮彫りにする目的でテーラー展開を行った後、エルミート多項式の微分に関する漸化関係⁽⁴⁾

$$\frac{d}{d\xi} H_j(\xi) = j H_{j-1}(\xi) \quad \dots\dots\dots (12)$$

を用いて次のごとく具体化される。

$$A_n = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j \frac{\langle v_k^i \rangle}{i! \sigma_y^i} \frac{\lambda_{nj}}{\sqrt{j!}} \frac{j!}{(j-i)!} \left\langle H_{j-i} \left(\frac{\sum_{i=0}^l a_i x_{k-i} - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right\rangle = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、上式の変形には入力 x_{k-i} と暗騒音 v_k の統計的独立性を利用している。また、 $\langle v_k^i \rangle$ は v_k のエルゴード性より時間平均にて算定される。(13)式の具体的な解法としては、例えば入力 x_k の逐次データが得られるならば、(13)式を未知パラメータ $\mathbf{a}$ に関する回帰関数とみて、公知の Robbins-Monro の確率近似法⁽⁵⁾ を適用することもできる。具体的には、未知パラメータの個数 $(l+1)$ だけ n を変え(13)式と同様な方程式の組を作って連立させた後、確率近似法を適用することにより、次の推定アルゴリズムを導出することもできる。

$$\hat{\mathbf{a}}_k = \hat{\mathbf{a}}_{k-1} + \Gamma_k \left[\begin{array}{c} A_{n_1}(\mathbf{x}_k, \langle v_k^i \rangle, \mu_y, \sigma_y, \lambda_{n_1 j}, \hat{\mathbf{a}}_{k-1}) \\ A_{n_2}(\mathbf{x}_k, \langle v_k^i \rangle, \mu_y, \sigma_y, \lambda_{n_2 j}, \hat{\mathbf{a}}_{k-1}) \\ \vdots \\ A_{n_{l+1}}(\mathbf{x}_k, \langle v_k^i \rangle, \mu_y, \sigma_y, \lambda_{n_{l+1} j}, \hat{\mathbf{a}}_{k-1}) \end{array} \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} & A_n(\mathbf{x}_k, \langle v_k^i \rangle, \mu_y, \sigma_y, \lambda_{n j}, \hat{\mathbf{a}}_{k-1}) \\ & \triangleq \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j \frac{\langle v_k^i \rangle}{i! \sigma_y^i} \frac{\lambda_{n j}}{\sqrt{j!}} \frac{j!}{(j-i)!} \\ & \quad \times H_{j-i} \left(\frac{\sum_{i=0}^l \hat{a}_{i, k-1} x_{k-i} - \mu_y}{\sigma_y} \right) \\ & \hat{\mathbf{a}}_k \triangleq [\hat{a}_{0, k}, \hat{a}_{1, k}, \dots, \hat{a}_{l, k}]^T \\ & \mathbf{x}_k \triangleq [x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-l}]^T \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。ここで、ゲイン行列 $\Gamma_k \triangleq \text{diag}(\gamma_k^{(1)}, \gamma_k^{(2)}, \dots, \gamma_k^{(l+1)})$ の各要素 $\gamma_k^{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, l+1$) には Robbins-Monro の収束条件

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k^{(i)} \rightarrow \infty \\ & \sum_{k=1}^{\infty} \{\gamma_k^{(i)}\}^2 < \infty \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

を満たす正数列 (例えば $1/k$) をとることができる。

また、(7)式は(12)式を用いると次のごとく変形される。

$$\sum_{n \neq 0} \left\langle \sum_{j=0}^n \frac{\lambda_{nj}}{\sqrt{j!}} H_j \left(\frac{\sum_{i=0}^l a_i x_{k-i} + v_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right\rangle \times \left\langle \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{ni}}{\sqrt{i!}} \frac{i}{\sigma_y} H_{i-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^l a_i x_{k-i} + v_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \mathbf{x}_k \right\rangle = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

(17)式の解法として、テーラー展開を行った後、前と同様に確率近似法を適用することにより次の推定アルゴリズムが得られる。

$$\hat{\mathbf{a}}_k = \hat{\mathbf{a}}_{k-1} + \Gamma_k \sum_{n \neq 0} A_n(\mathbf{x}_k, \langle v_k^i \rangle, \mu_y, \sigma_y, \lambda_{n j}, \hat{\mathbf{a}}_{k-1}) \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{j-1} \frac{\lambda_{nj}}{\sqrt{j!}} \frac{j}{\sigma_y} \frac{\langle v_k^i \rangle}{i! \sigma_y^i} \frac{(j-1)!}{(j-i-1)!} \left\langle H_{j-i-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^l \hat{a}_{i, k-1} x_{k-i} - \mu_y}{\sigma_y} \right) \mathbf{x}_k \right\rangle \quad \dots\dots\dots (18)$$

(14), (18)式の推定アルゴリズムにおいて、利用する暗騒音 v_k の情報としては、瞬時値でなく安定したその各次モーメント統計情報のみでよい。

更に、デシベル変量でのモデル(9)式に対しては、いったん

$$Y_k = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} (10^{V_k/10})^j \left(\frac{d}{d\xi} \right)^j (10^{10\xi}), \quad \left(\xi \triangleq \sum_{i=0}^l a_i 10^{x_{k-i}/10} \right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

のごとく変形した後、(5), (7)式に適用し確率近似法を用いれば、前と同様、暗騒音 V_k に関しては統計

図1 残響室-残響室における実験の構成図
Fig. 1. Block diagram of the experimental arrangement in two reverberation rooms.

量のみの情報を利用した推定アルゴリズムを導くことができる。

〈2・4〉 任意騒音を入力した遮音システムの応答分布予測 前節での推定結果を用いて、あらかじめ与えられた他の任意騒音入力を用い、そのデータからシ

ステムモデルの（暗騒音がない場合における）出力時系列

$$\hat{z}_k = \sum_{i=0}^l \hat{a}_i x_{k-i} \quad (\text{エネルギー変量の場合}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

図 2 部分的評価法による斜め二重壁のシステムパラメータに対する推定結果

Fig. 2. Estimated results for system parameters of non-parallel double wall by use of a partial error evaluation method.

図 3 部分的評価法によるサウンドブリッジのシステムパラメータに対する推定結果

Fig. 3. Estimated results for system parameters of double wall with sound-bridge by use of a partial error evaluation method.

$$\hat{Z}_k = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=0}^L \hat{a}_i 10^{X_{k-i}/10} \right\}$$

(デシベル変量の場合)(21)

を逐次発生させ得る。ただし、 $\hat{a}_i$ は先に推定した値

である。この結果、この時系列モデルの出力に関する(評価量 L_x に結び付く)累積分布を直接評価することが可能となる。

(a) 部分的評価法

(b) 組合せによる評価法

図 4 斜め二重壁の出力応答分布予測に対する理論曲線と実測値の比較

Fig. 4. A comparison between theoretically predicted curves and experimentally sampled points on the output probability distribution for non-parallel double wall.

3. 実験的考察

〈3・1〉 実遮音システムと実験条件 実験は音響実験室の残響室—残響室内に次の二種類の遮音材を設置して遮音システムの同定と異種騒音入力下の応答分布予測に関する実験を行った (図1)。

(1) 斜め二重壁 互いに 9° の角度をもたせた二枚のアルミ板からなる中空二重壁。

(2) サウンドブリッジのある二重壁 二枚のアルミ板の間に間柱を入れた二重壁 (二枚のアルミ板の間隔は 50 mm)。

ただし, アルミ板はすべて面密度 3.22 kg/m^2 , 厚

(a) 部分的評価法

(b) 組合せによる評価法

図5 サウンドブリッジの出力応答分布予測に対する理論曲線と実測値の比較

Fig.5. A comparison between theoretically predicted curves and experimentally sampled points on the output probability distribution for double wall with sound-bridge.

さ1.2 mmのものであり、試料取付け面積は1.46 m²である。

パラメータを推定するための入力信号としては、ノイズジェネレータから発生した全帯域の白色雑音を用いた。すなわち、音源室側のエネルギー密度を入力、受音室側のエネルギー密度を出力とし、入出力間の同期をとりながらサンプリング周期1秒で1,000個のデータを摂取した。次に、出力を改めて無響室内で再生し、暗騒音として別の白色雑音を加えて逐次観測を行った。また、暗騒音の統計情報を得るために、暗騒音のみのデータをあらかじめ採取しておいた(サンプリング間隔1秒、データ数1,000個)。更に、出力分布の予測に用いる任意騒音入力としては、事前に市街地で実測しデータレコーダに記録しておいた道路交通騒音を残響室で再生し、その入力データおよび出力データを互いに同期をとりながら逐次摂取した(サンプリング間隔1秒、データ数1,000個)。

〈3・2〉 実験結果 実遮音システムとして上述した二種類の遮音壁を具体例にとり、システムパラメータの逐次推定をまず行った[(8), (9)式におけるモデルの次数は既発表の考察⁽⁶⁾によりあらかじめ2に選定している]。逐次推定の例を図2(推定アルゴリズム(14)式を用いたときの、斜め二重壁に対する推定結果)および図3(同じくサウンドブリッジをもつ二重壁に対する結果)に示す。いずれのパラメータも、二つの相異なる任意初期値を採用したにもかかわらず、ほぼ同じ推定結果を得ている。

次に、この推定結果を用いて、同じ遮音システムに、今度は道路交通騒音を入力させ、そのときの累積分布を予測した。図4に斜め二重壁に対する予測結果を、図5にサウンドブリッジに対する予測結果を示す[両図において、(a)図は(14)式により推定されたパラメータを用いた場合、(b)図は(14), (18)式を組合せたアルゴリズムにより推定されたパラメータを用いた場合である]。ただし、横軸にはデシベル値をとって理論、実験の各累積分布を描いている。本手法による理論的予測分布は実測変動分布をよくとらえており、これらの実験を通して出力応答分布予測に整合した本同定手法の有効性が十分うかがえる。

4. ま と め

本研究では、任意の変動分布を示す入力騒音が任意の遮音システムに印加され、しかも任意分布形の外来雑音が存在する極めて複雑な状況下で、そのパラメータ同定問題の一試みを提案した。その際、騒音評価量 L_x や分布評価との直接的な対応を目指し、応答の確

率分布予測へ少しでも整合させるため時系列モデルの導入のもとに、出力に関する確率分布情報を基盤にした一同定法を提案した。具体的には、実測により事前情報としてあらかじめ入手できる出力分布情報が、入出力間におけるシステムのモデル構造を反映して構築した理論分布と合致するような評価規範を、階層的な展開表現として新たにまず導出した。次に、これを部分的または総合的にいかに利用するかにより、三種の異なった観点からの評価法とパラメータ推定アルゴリズムを導出した。本手法は、ガウス分布特性または平均・分散といった低次モーメント情報のみに力点をおく従来の標準的評価法と異なり、任意騒音入力に対する出力応答の揺らぎ分布形状全体を予測する目的志向形の推定アルゴリズムとなっている点が大きな特徴と言える。更に、従来、理論的解析が非常に困難であった斜め二重壁やサウンドブリッジをもつ二重壁を取上げ、残響室——残響室内での実測データに本手法を適用して、その有効性を実験的にも検証した。

もちろん、本論文はまだ基礎的研究の段階にあり、今後、この上に積み上げていくべき多くの問題点が残されている。例えば、(i)本手法を現実の環境騒音分野における複雑な多くの実システムへ適用し、その有効性をますます確認してゆくこと、(ii)マイクロプロセッサの利用による推定アルゴリズムのファームウェア化を図ること、(iii)本研究で提案した三種の評価法や推定アルゴリズムの相異が、推定されたパラメータや応答分布にいかに影響するかについての定量的な検討、(iv)確率近似法の収束性をより改善するための工夫、(v)階層的な表現形式で与えられたパラメータ同定アルゴリズムはいかなる階層性の水準で対処すれば最適となるか、などが今後の課題として残されている。

本研究に多大の援助をいただいた畠山一達、中迫昇、岡崎猛史、畑山佳紀の各氏、および日本騒音制御工学会昭和61年度技術発表会⁽⁷⁾において御討論いただいた関係各位に感謝する。

(昭和63年10月27日受付、平成元年4月24日再受付)

文 献

- (1) 相良、他：システム同定(昭56)計測自動制御学会
- (2) M. J. Crocker & A. J. Price: "Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis", *J. Sound Vib.*, 9, 469 (1969)
- (3) 岩重・太田：「一般N重壁の透過損失に関する改良型S. E. A. 法からの予測手法」, 音響学誌, 37, 484 (昭56)
- (4) 吉田、他：応用数学便覧, p. 397 (昭42)丸善
- (5) H. Robbins & S. Monro: "A Stochastic Approximation Method", *Ann. Math. Stat.*, 22, 400 (1951)
- (6) 太田・山田：「任意遮音システムの出力エネルギー分布に関する最小自乗法からの簡易的予測手法」, 音響学誌, 39, 756

(昭58)

- (7) 生田・太田：「暗騒音混入下における遮音壁の機能的同定法と出力分布予測」，騒音制御工学会講義集，p.181 (昭61)

付 録

シエミットの直交化法により算定された係数 λ_{ij}

$$\lambda_{ij} = (\sqrt{d_{i-1}d_i})^{-1} \cdot (d_i(y_k) \text{ 行列の } (i, j) \text{ 余因子})$$

.....(付1)

$$d_i(y_k) = \begin{vmatrix} (\phi_0, \phi_0) & (\phi_0, \phi_1) & \cdots & (\phi_0, \phi_i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\phi_{i-1}, \phi_0) & (\phi_{i-1}, \phi_1) & \cdots & (\phi_{i-1}, \phi_i) \\ \phi_0(y_k) & \phi_1(y_k) & \cdots & \phi_i(y_k) \end{vmatrix}$$

.....(付2)

$$d_i = \begin{vmatrix} (\phi_0, \phi_0) & (\phi_0, \phi_1) & \cdots & (\phi_0, \phi_i) \\ (\phi_1, \phi_0) & (\phi_1, \phi_1) & \cdots & (\phi_1, \phi_i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\phi_i, \phi_0) & (\phi_i, \phi_1) & \cdots & (\phi_i, \phi_i) \end{vmatrix}$$

.....(付3)

$$\phi_i(y_k) \triangleq \frac{1}{\sqrt{i!}} H_i \left(\frac{y_k - \mu_y}{\sigma_y} \right) \quad \text{.....(付4)}$$

$$(\phi_i, \phi_j) \triangleq \int \phi_i(y_k) \phi_j(y_k) P_R(y_k) dy_k$$

$$= \delta_{ij} + \sum_{l=0}^{\infty} a_l h_{ijl} / \sqrt{i!j!l!} \quad \text{.....(付5)}$$

$$h_{ijl} \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} H_i(\xi) H_j(\xi) H_l(\xi) N(\xi; 0, 1) d\xi$$

$$= \begin{cases} i!j!l!/(s-i)!(s-j)!(s-l)! \\ \quad (i+j+l \triangleq 2s) \text{ が偶数のとき} \\ 0 \quad (i+j+l \text{ が奇数または } s < i, \\ \quad s < j, s < l \text{ のとき}) \end{cases}$$

.....(付6)

太田 光雄 (正員)

昭和27年京都大学理学部物理学科卒業。神戸大学工学部助教授，福井大学工学部教授を経て，44年広島大学工学部教授。理学博士。信号処理，環境制御（音響・振動），通信，情報などの研究に従事。41年音響学会論文賞受賞。

生田 顕 (正員)

昭和26年11月5日生。56年広島大学大学院博士課程後期修了。同年九州工業大学情報工学科助手。現在，広島大学工学部助手。信号処理，デジタルフィルタ，環境（音響・振動）の研究に従事。工学博士。

肖 業 貴 (正員)

1984年中国・東北工学院卒業。現在，広島大学大学院博士課程2年在学中。信号処理，デジタルフィルタ，環境制御（音響・振動），最適制御などの研究に従事。