地震観測波形によるボイラ構造物の動特性同定* (一入力多出力モデルによる同定)

西田 英一^{*1}, 鈴木 浩平^{*2}
曾根 彰^{*3}, 今村 正勝^{*4}

Modal Identification of Boiler Plant Structures by Seismic Records (Identification based on a Single-Input/Multi-Output Model)

Eiichi NISHIDA, Kohei SUZUKI,
Akira SONE and Masakatsu IMAMURA

This paper deals with an experimental modal analysis method for large-scale structures such as boiler plants in thermal power stations. Practical and accurate modal identification has been carried out by the proposed method, which is composed of two stages: (1) processing transfer functions by autoregressive (AR) spectral analysis, and (2) a curve-fitting technique to extract modal parameters. Seismic records of base acceleration are utilized as input data, and a series of response acceleration records at various points of the structure are utilized as multi-output data. This method is examined using time-series data of seismic response simulation. Introduction of two techniques, namely, decimation of time data and FPE criterion to optimize the order of the AR model, have realized effective and accurate identification. This method has actually been applied to in-situ seismic observation data of a boiler plant in operation. As a result of these investigations, this kind of modal identification has proven to be an effective tool for seismic modeling of large-scale structures.

Key Words: Vibration, Random Vibration, Modal Analysis, System Identification, Autoregressive Model, Transfer Function, Seismic Records, Seismic Analysis, Boiler Plant

1. 序 言

実験的な振動解析手法としてのモード解析は広範な構造物の動特性同定に応用されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、火力発電用ボイラのような超大形かつ大重量構造物への適用においては、大規模な加振装置を用いても構造全体を加振することは実際には困難であることや、加振試験に必要なプラント停止期間が限定されることなど、同定精度、実測における経済性や効率性の面で問題がある。

本研究は、火力発電用ボイラ構造物の地震応答シミュレーション精度の向上とその検証を目的とした、高精度で実用的な動特性同定手法の開発に関するものである。その一手法として、前報⁽³⁾では既設プラントにおける常時微動測定によって得たフィールドデータを用いた同定法を提案し、それを用いた三次元固有モードの同定結果について報告した。具体的には、対象となるボイラ構造物は近接した多数の固有モードを有

し、さらに、構造的な非対称性によるねじりモードも加わり、極めて複雑な動的挙動を示すこと、また構造物基礎の複数方向加速度入力を同時に考慮した、多入力多出力系の動特性同定法によりこれらの固有モードを高精度に同定できることなどを明らかにした。

この過程において、次の課題として、同定されたモード特性、特にモード減衰比の振幅依存特性の精細な把握が耐震設計のうえで必要となってきた。本研究はこの要請にこたえるべく、地震観測により得たフィールドデータを用いた、ボイラ構造物の実用的な動特性同定法を提案するものである。

ところで、地震観測データによる同定においては周知のように、時系列データ長に制限があるために、従来のFFTによるスペクトル解析法を用いたモード解析では高精度な同定は困難である。このような場合にも有効な一つの手法として、自己回帰(AR)モデルなどの時系列モデルによる同定法がある。これは二つの手法に大別される。つまり、当初開発された、時系列モデルによるスペクトル解析法⁽⁴⁾を用いて周波数伝達関数を求め、次にその曲線適合により同定する方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾、および、その後開発された、時系列モデルよりパルス伝達関数を経て直接的に時間領域で同定する方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾である。

* 原稿受付 平成元年10月25日。

^{*1} 正員、パプコック日立(株)呉研究所 (〒737 呉市宝町3-36)。

^{*2} 正員、東京都立大学工学部 (〒158 東京都世田谷区深沢2-1-1)。

^{*3} 正員、京都工芸繊維大学工学部 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

^{*4} 正員、パプコック日立(株)呉工場 (〒737 呉市宝町6-9)。

一方、従来のFFTに依拠するモード解析においても、多入力多出力系に有効な実用的で高精度な曲線適合アルゴリズムが開発される⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾など、新たな展開をみせている。これらの状況を勘案すると、曲線適合手法における特徴と、時系列モデルによるスペクトル解析法におけるスペクトル曲線の平滑化という長所を併用した同定手法も、ボイラ構造物のような多入力多出力系には有効であろうことが期待される。

以上述べた背景のもとに本論文では、ARモデルによるスペクトル解析と曲線適合の両者を活用した、混合的な動特性同定システムを開発し、その同定精度を検証した後、実機ボイラ構造物に適用してその実用性を確認したので、それらの結果について報告する。

2. ARモデルを用いた同定方法

2・1 同定システム 動特性同定の方法として図1に、従来のFFTと曲線適合に基づく同定(A)と、時系列(AR)モデルからの直接的同定(B)の流れを示す。図1中の太線は今回開発した両者を併用する方法、つまりARモデルのあてはめにより得られた周波数伝達関数の曲線適合による同定の流れを示す。FFTに基づく方法(A)では、多入力多出力形の曲線適合をはじめとして曲線適合自体が高精度化されたことにより、同定精度は周波数伝達関数の算出精度に大きく依存することになる。そして高精度なスペクトルを得るためには、スペクトルの平均化回数の増加を伴い、多量の時系列データが必要となる。これに対し、ARモデルからの直接的同定(B)は、AR係数の最小二乗推定に基づくものであるが、この統計操作によれば比較的少ない時系列データからでも高精度な同定が可能である。本研究で採用した手法(C)は、上記の両者の長所を取り込んだ混合的方法である。

本研究において開発した同定システムの構成を図2

図1 同定法の構成

に示す。基本的には、構造物基礎の入力加速度 $\ddot{x}(s)$ と構造物の多点における応答加速度 $\ddot{y}_i(s) (i=1 \sim n)$ で構成される多次元時系列データより、一入力多出力の基礎励振系の動特性同定を行うものである。本システムは、後の解析の準備段階としての前処理を行う部分(I)、ARモデルのあてはめから周波数伝達関数の算出までの部分(II)、および曲線適合によりモーダルパラメータを同定する部分(III)より構成される。以下、各部の内容を説明する。

前処理部(I)では波形データのA-D変換、デジタルフィルタ、データの間引き(decimation)および応答加速度データの絶対加速度 $\ddot{y}_i(s)$ から基礎に対する相対加速度 $\ddot{\tilde{y}}_i(s)$ への変換の四つの処理を行う。最初に間引き操作について述べる。ARモデルによるスペクトル解析を行ううえでの重要なパラメータであるサンプリング周波数、あるいはデータ数に関しては、時系列データの間引きがARモデル同定の高効率化、高精度化上有効であることが報告されている⁽¹¹⁾。一方データ数が少なすぎると、ARモデルの同定に必要な相関関数の算出精度が劣化することになる。そこで、サンプリング周波数、あるいはデータ数の影響を検討するため、図2に示すように本システムの前処理部分において時系列データの間引き操作を行うことにした。なお、その前にあるデジタルフィルタはローパスフィルタ機能を有し、間引き操作による精度劣化の

図2 同定システムの流れ

図3 2変数ARモデル

一因となるエリアシングを防止するためのものである。

次に応答加速度データの絶対値から相対値への変換であるが、この操作はこれまでに開発され、実用化されている“力加振系”を対象とした曲線適合手法を本研究のような“基礎励振系”に直接適用するうえで不可欠である⁽³⁾。

周波数伝達関数の算出部分(II)については2・2節で詳述する。

最後に周波数伝達関数の曲線適合の部分(III)について述べる。曲線適合手法としては、多入力多出力系の同定に有効な手法である、時間領域におけるVoldの手法⁽⁹⁾を用いた。本研究においてはボイラ構造を一入力多出力系とみなし、各応答点における周波数伝達関数群を同時に曲線適合した。なお本手法は雑音に対して比較的強いことが報告されており⁽¹²⁾、本研究のようなフィールドデータを使用する場合に適している。

2・2 ARモデルによる周波数伝達関数の算出方法
本システムにおける同定精度は、すでに述べたように周波数伝達関数の算出精度に大きく依存する。周波数伝達関数の算出方法としては、すべての応答点の時系列データを同時に用いてARモデルおよび周波数伝達関数を算出することも考えられる。しかしその場合にはARモデルの同定の際に複数の応答点の時系列データが相互に影響しあい、これが同定精度が劣化する一因となる。そこで本システムでは、入力 \$\ddot{x}(s)\$ と特定の出力 \$\ddot{y}_i(s)\$ の組合せによる1入力1出力の時系列データに対する2変数ARモデルのあてはめと、それに基づく周波数伝達関数の算出操作を、全出力に対して \$n\$ 回行うことにした。

以下、周波数伝達関数の算出方法を示す。図3は次式で表される2変数ARモデル

$$X(s) = \sum_{m=1}^M A(m) \cdot X(s-m) + U(s) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、

$$X(s) = \begin{bmatrix} \ddot{y}_i(s) \\ \ddot{x}(s) \end{bmatrix}$$

$$A(m) = 2 \times 2 \text{ AR 係数行列}$$

図4 ボイラプラントにおける地震計の配置

$$U(s) = \begin{bmatrix} u_y(s) \\ u_x(s) \end{bmatrix} : \text{残差ベクトル}$$

の、時系列データ \$\ddot{x}(s), \ddot{y}_i(s)\$ へのあてはめの状況を示す。このモデルを用いてAR係数行列 \$A(m) (m=1 \sim M)\$ を同定する際に、AR次数 \$M\$ の最適値を設定する必要がある。その方法として、入力 \$\ddot{x}(s)\$ により出力 \$\ddot{y}_i(s)\$ を予測する際の誤差である \$u_y(s)\$ を用いた場合の、赤池のFPE規範⁽⁴⁾を用いた。つまり、

$$\begin{aligned} \text{FPE}(M) &= \left(1 + \frac{2M+1}{N}\right) \\ &\times \left(1 - \frac{2M+1}{N}\right)^{-1} \cdot E\{u_y^2(s)\} \quad \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

を最小にする \$M\$ を最適次数とした。ここに \$N\$ はデータ数であり、\$E\{\cdot\}\$ は時間平均を示す。計算法は逐次形高速計算法であるLevinson-Durbinのアルゴリズム⁽¹³⁾を用いている。

次にこれらのAR係数行列 \$A(m)\$ のフーリエ変換 \$B(f)\$ (\$2 \times 2\$ 行列)を算出した後、スペクトル密度行列

$$\begin{aligned} C(f) &= \begin{bmatrix} c_{yy}(f), & c_{yx}(f) \\ c_{xy}(f), & c_{xx}(f) \end{bmatrix} \\ &= B^{-1}(f) \cdot E\{U(s) \cdot U^T(s)\} \{B^H(f)\}^{-1} \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

を算出する。ここに、\$^T\$ は転置行列、\$^H\$ は転置共役行列を示す。周波数伝達関数 \$G_{y_i, x}(f)\$ は次式により算出される。

$$G_{yi,x}(f) = \frac{c_{xy}(f)}{c_{xx}(f)} \dots\dots\dots (4)$$

なお、本手法の長所の一つとして、次式

$$\gamma^2(f) = \frac{|c_{xy}(f)|^2}{c_{xx}(f) \cdot c_{yy}(f)} \dots\dots\dots (5)$$

により算出されるコヒーレンス関数 $\gamma^2(f)$ を用いれば入出力間の線形性を検証できる点が挙げられる。

3. ボイラ構造物の動特性同定

3・1 ボイラ構造物と地震観測データの特性 本手法の具体的な適用対象として選んだボイラプラントの側断面図を図4に示す。このプラントは重油を燃料とし、出力は100万kW、高さ約64m、ボイラ全体の重量は約8000tの超大形構造物である。ボイラ本体は箱形構造であり、その熱膨張を下方に逃がすために支持鉄構でつり下げる構造となっている。ボイラ本体には

表1 地震観測データ諸元

Event No.	Date	Mag.	Epicenter		
			Lat. (N)	Long. (E)	Depth (km)
16	Mar. 7, '82	5.6	36° 5'	140° 7'	60
45	Jul. 24, '82	6.2	36° 6'	142° 6'	40

図5 地震観測加速度波形

図6 入力波形のパワースペクトル密度

地震荷重、風荷重など、水平方向に大きな荷重が作用するが、これに対処するためボイラ本体と支持鉄構の間に振れ止め部(サイスミックタイ)を適宜配置した構造となっている。

動力学的な観点から見た場合、非対称な構造となっていること、振れ止め部に数mmのギャップを有することなど、原子力建屋や高層ビルディングなどに比べて特異な構造となっており、その結果として非常に複雑な動的挙動を示す。

上記のボイラプラントに地震観測装置を設置し、図4に示す位置に地震計を配置した。その際、FEMによる固有値計算結果⁽³⁾を参考にし、特に耐震設計上重要な低次の固有モードを検出できるよう配慮した。また厳密には三次元の地震入力を考慮する必要があるが、構造非対称性に起因するねじりモードなどの複雑な動特性の影響が小さいy方向の応答に着目し、ボイラ基礎(6y)の入力加速度と構造物各部(1y~5y)の応答加速度より1入力5出力系として時系列データを構成し、動特性を同定した。

なお入力波形の選択においては、周波数特性の異なる表1に示す地震波形2波(以下、EV16, EV45で示す)を採用し、同定結果に及ぼす影響を検討した。これらの波形データを図5に示すが、2波とも震度2に相当する。またAR法によって計算した入力加速度波形のパワースペクトル密度を図6に示す。これらの図よ

表2 数値シミュレーションのためのモデルモデル

	Y-1	Y-2	Y-3
Mode shape			
fn(Hz)	0.95	1.97	2.66
ζn	0.05	0.05	0.05
βn	3.47	1.21	0.43

fn: Natural freq., ζn: Damp. ratio
βn: Participation factor

表3 動特性同定の条件

Time histories	EV16, EV45	
Data size : N	256	512
Sampl. freq. (Hz)	8Hz	16Hz
Nyquist freq. (Hz)	4Hz	8Hz

り地震波 EV 16 は EV 45 に比較して、高周波数成分が卓越していることがわかる。また両波形ともボイラ構造物の固有振動数が存在する周波数領域(約 1~3 Hz)の成分を十分含んでおり、動特性同定上好適であると言える。

3・2 数値シミュレーションによる同定精度の検証
 実機ボイラの動特性同定における解析条件の検討、および同定精度の検証を目的として、数値シミュレーションにより作成した時系列データに本同定システムを適用し、解析条件の差異による比較検討を行った。具体的には、ボイラ構造物の固有振動数、固有モードおよびモード減衰比から成るモーダルモデルを用いて時刻歴応答シミュレーションを行い、その結果得られた時系列データから、図 2 に示す手順で周波数伝達関数を算出し、それを上記のモーダルモデルより得られる厳密解と比較した。ボイラ構造物のモーダルモデルは、先に実施した常時微動測定データによる動特性同定⁽³⁾の結果として得られた 1~7 次の固有モードを用いて構築したが、モード減衰比は各次固有モードとも一律

に設計上の標準値である 5% に設定している。表 2 にこれらの中で、着目している y 方向の変形が卓越した三つの固有モードのモーダルパラメータを示す。他の四つの固有モードは x 方向、あるいはねじりの変形が卓越しており y 方向の刺激係数は小さいため、動特性同定結果にはほとんど影響しないことを確認している。なお、数値シミュレーションにおいては、表 1 に示す二つの地震観測データにおけるボイラ基礎 (6 y) の加速度波形を入力とし、Newmark の β 法 ($\beta=0.167$) により時間刻み $\Delta t=0.0156$ s、ステップ数 2048 の条件で計算した。

次にこれらの時系列データによる動特性同定において重要である、データ数 N と、AR 次数 M が周波数伝達関数の算出精度に与える影響を検討した。まずデータ数 N については、サンプリング周波数 $f_s=64$ Hz で A-D 変換された原データ ($N=2048$) の間引きにより、表 3 に示すケースについて検討した。つまり、ボイラ構造物の固有振動数を考慮して着目する周波数の最大値 $f_{\max}$ を 4 Hz とし、これを Nyquist 周波数とした場合 ($N=256$)、および Nyquist 周波数を $f_{\max}$ の 2 倍とした場合 ($N=512$) の 2 ケースである。

これらの検討結果の一例として、図 7 に観測点 5 y

(a) 地震波: EV 16

(b) 地震波: EV 45

図 7 AR モデルによる周波数伝達関数の算出精度 ($G_{5y,6y}$)

(a) 地震波: EV 16

(b) 地震波: EV 45

図 8 シミュレーション波形における AR 次数の最適値 (入力: 6 y , 出力: 5 y)

表 4 動特性同定結果

Items	Earthquakes		Microtremor
	EV16	EV45	
Natural freq. (Hz)	0.90	0.88	0.95
	1.64	1.75	1.97
	2.21	—	2.66
	2.84	—	—
Damp.ratio	0.064	0.070	0.027
	0.107	0.087	0.026
	0.067	—	0.030
	0.038	—	—

(a) 地震波: EV 16

(b) 地震波: EV 45

図 9 実地震観測波形による周波数伝達関数

における周波数伝達関数の同定結果を厳密解と比較して示す。地震波 EV 45 では $N=256$, 512 の両方とも精度は良好であるが、高周波数成分が比較的多い EV 16 では $N=512$ では精度は良好であるものの、 $N=256$ では誤差が大きいことがわかる。なお、他の観測点についても同様な結果を得ている。

AR 次数 M についても種々の M の値に対して同様な検討を行ったが、本研究で扱った範囲においては FPE 規範に基づく方法が最も有効で、精度の良い同定結果が得られた。図 7 に示す周波数伝達関数はこの規範によるものであるが、その場合の AR 次数 M と FPE 値の関係を図 8 に示す。この図は $6y$ (入力), $5y$ (出力) の二つの時系列より AR モデルを同定した場合の AR 次数 M と式 (2) の FPE 値(最大値を 1 に規格化)の関係を示したものであるが、最大 30 次まで計算した範囲では矢印の部分で FPE 値が最小となったため、この値を最適な AR 次数として採用して同定処理を進めた。

以上の結果、Nyquist 周波数が着目する最大周波数の 2 倍となるようなサンプリング条件 ($N=512$) と、AR 次数の決定における FPE 規範の採用により、高精度な周波数伝達関数が得られることを確認できた。

3・3 実機ボイラ構造物の動特性同定 本節では、表 1 に示す二つの地震観測データによる実機ボイラ構造物の動特性同定結果、および先に実施した常時微動測定データによる同定結果⁽³⁾との比較評価について述べる。

まず地震観測データによる同定結果であるが、1 入力 5 出力系としての同定を行った。その過程で得られた周波数伝達関数 $G(f)$ の一例として、支持鉄構頂部 [$G_{1y,6y}(f)$] およびボイラ本体下部 [$G_{5y,6y}(f)$] のデータを図 9 (実線) に示す。また、出力 5 成分の $G(f)$ 群

を対象とした曲線適合により得られた固有振動数、モード減衰比の同定結果を表 4 に示す。曲線適合の精度を検証するため、これらの同定結果を用いて合成した $G(f)$ を図 9 に点線で示すが、実測データより得られた $G(f)$ (実線) を良く再現していることがわかる。この結果と、先に述べたように $G(f)$ の算出精度が良好であることを総合的に判断すると、表 4 に示す動特性同定結果の信頼性は高いと言える。

次に、入力波形の特性とボイラ構造物の動特性との関係について考察する。図 10 は、二つの地震波 (EV 16, EV 45) および常時微動測定データより算出した周波数伝達関数 $G(f)$ 、およびコヒーレンス関数 $\gamma^2(f)$ を比較して示したものである。また参考のために、常時微動測定により同定した、 y 方向の変形が卓越する三つの固有モード (表 2 の Y-1~Y-3) の固有振動数を図 10 の上部に▽印で示す。まず着目する周波数領域 1~3 Hz における地震観測データの $\gamma^2(f)$ は部分的に低レベルとなるが、着目する固有モードの振動数付近では 0.8 以上となり、同定上問題ないレベルにあると言える。また $G(f)$ のピークに関しては、常時微動に比べて大振幅の地震波ではピークは低くなり、ピーク周波数は低周波数側に移行している。

次に二つの地震波の $G(f)$ を比較すると、ボイラ本体下部 [$G_{5y,6y}(f)$] の高次モードのピークが地震波 EV 45 では一つ (1.75 Hz) であるのに対し、EV 16 では二つに分離 (1.64, 2.21 Hz) している。この理由の一つとして、地震波 EV 16 は図 6 に示すように高周波数成分を多量に含んでいるため、高次モードの同定精度の面で有利であることも一因と考えられる。なお表 4 における同定結果の中で、特にモード減衰比については常時微動データによる値 (約 3%) に対し、地震観測データ 2 波による値は全体として 6% 以上と増加して

(a) $G_{1y,6y}$ (b) $G_{5y,6y}$

図 10 入力波形と周波数伝達関数

いる。この点については今後、モード減衰比の振幅依存性を定量的に把握すべくデータの蓄積を図る必要がある。

4. 結 言

火力発電用ボイラのように、加振実験を伴う従来のモード解析を直接に適用することが困難な、超大型で大重量を有する建造物に対し、その地震時挙動を解明するための実用的な動特性同定法の提案を行った。得られた結論を以下に要約する。

(1) 地震観測データの AR モデルによるスペクトル解析と曲線適合手法を組合せた、1入力多出力系の動特性同定システムを開発した。

(2) 数値シミュレーションによる時系列に本システムを適用して得られた周波数伝達関数は、厳密解との良好な一致を見た。

(3) 本システムを実機ボイラの地震観測データに適用し、4次までの固有モードを精度よく同定できた。

(4) 地震観測データ2波(震度2)によるモード減衰比の同定結果は約6%と、常時微動測定データによる値の2倍程度となった。

これらの結果に基づき、ボイラ建造物の地震応答において卓越する低次の固有モードの同定における提案手法の実用性、信頼性を確認できた。今後、上記システムの同定精度、実用性をさらに高めるために、多入力多出力系の動特性同定に向けて機能を拡張し、ねじり

モードを含むボイラ建造物の三次元的な挙動の解明を進める所存である。

文 献

- (1) 酒井・大堀・佐藤・尾高, 工作機械要素構造の振動解析, 機論, 810-13, (1981), 115.
- (2) 白井・石野・池内, ステップ加振法と部分構造合成法による橋りょう用動吸振器の効果予測, 機論, 50-452, C (1984), 737.
- (3) 西田・鈴木, 常時微動測定によるボイラ建造物の動特性同定, 機論, 56-522, C (1990), 385.
- (4) 赤池・中川, ダイナミックシステムの統計的解析と制御, (1972), サイエンス社.
- (5) 鈴木・中嶋, AR 時系列解析法の特徴を利用した振動系の減衰比推定法, 機論, 48-433, C (1982), 1389.
- (6) 鈴木・原田, AR 時系列解析法を用いた振動系の構造非定常性解析, 機論, 50-458, C (1984), 2013.
- (7) 鈴木・河之邊, 2変数 AR モデルを用いた動特性同定法, 機論, 53-487, C (1987), 550.
- (8) 鈴木・河之邊, $ARMA$ モデルを用いた振動モード特性の同定法(第1報, 逐次計算法によるスカラー法), 機論, 53-496, C (1987), 2245.
- (9) Vold, H., Kundrat, J., Rocklin, G. T. and Russel, R., A Multi-Input Modal Estimation Algorithm for Mini-Computers, *SAE Paper*, No. 820194 (1982).
- (10) 吉村・長松, モード解析に関する研究(第9報, 多点加振に対応した最尤法に基づく曲線適合方法の提案—その1), 機論, 56-523, C (1990), 527.
- (11) Quirk, M. P. and Liu, B., Improving Resolution for Autoregressive Spectral Estimation by Decimation, *IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Process.*, 31-3, (1983), 630.
- (12) 長池・長松・吉村, モード解析に関する研究(第4報, 多点曲線適合(その1)), 機論, 51-472, C (1985), 3369.
- (13) 中嶋, 信号解析とシステム同定(1988), コロナ社.