並立弾性構造物の地震応答制御に関する基礎的研究*

栗原 和 昭^{*1}, 原本 英 毅^{*1}, 背 戸 一 登^{*2}

Basic Study on Seismic Response Control for Flexible Structures Arranged in Parallel

Kazuaki KURIHARA, Hideki HARAMOTO and Kazuto SETO

This paper proposes a active vibration control method for flexible structures arranged in parallel under large earthquake motions. In this method, actuators are placed between a pair of structures to control the undesirable system response due to strong wind and earthquake motions. The relative displacement of base point and the control sensing points are effectively used to device control law. We also propose a modeling method for making a multi degree of freedom model using the uncontrollability and unobservability to prevent spillover which invites serious problem in the active control. In this paper, the reduced order model of control objects expressed by 3DOF system for controlling the vibration of first, second and third bending modes is constructed. In order to obtain the robustness, the control scheme is constructed by the use of the filtered suboptimal control technique combined into LQ control theory. Effectiveness of the control schemes is demonstrated by the seismic response control of a pair of flexible structures.

Key Words: Vibration Control, Flexible Structure, Modeling, Spillover, LQ control theory, Earthquake

1. 緒 言

このたびの阪神淡路巨大地震では、一般住宅のほかにも10階建程度の中層ビルが大きな被害を受けた。また、倒壊には至らなかったけれども高層ビルにもかなりの損傷があった。改めて、わが国のような地震国では大地震に対して強靱なビル構造物の建設が要請されている。大地震から建造物を保護するために、従来免震設計と柔構造設計の2とおりの考え方が採られてきた。前者は、積層ゴム等を用いて建造物の床を浮かせる方法であり、低層ビルや床面積の大きなビルには有効な方法であり、すでに実績が示されて最近建設されるビルに盛んに導入され始めた。しかし、この方法を既存のビルに使用するには多くの建設費が掛かるし、ロッキングモーションが懸念されるので中層・高層ビルには使えない。一方、柔構造設計の考え方は、ビルの被害に最も関係する最低次の固有振動数を地震の卓越振動数の影響を受けない程度に低く設計する方法であって、超高層ビルによって実現されている。しかし、

10階建ての固有振動数がおおむね1 Hz付近にあることを考えれば、この方法も中層ビルには適用できない。

このように最も多く建設されている中層ビルが耐震設計上大きな問題を抱えている。さらに、前述したように巨大地震に対して倒壊こそ免れたが、柔構造設計だけでは超高層ビルといえども局所的な被害は免れないことがわかった。この問題を解決する有力な手法として、ビルの制振設計がある。この方法の代表例はアクティブ・マスダンパ(略称ATMD)と呼ばれる制振装置をビルの上部に取付けて、センサによって測定された振動情報を基にビルの揺れを抑えるようにこれを制御するものである。しかし、この方法は質量のもつ慣性力を利用して制御力を得ているので、大きな制御力を得ることが難しい。したがって、風に対する制御には有効であるが大地震に対するビルの応答制御には適当な方法とはいえない。

そこで著者らは、この制振法に代わる方法として構造物を並立させ、各構造物間に複数のアクチュエータを設置して、各構造物の相互作用によって振動を制御する「ビル連結方式」を提案している⁽¹⁾。この方法は大きな制御力が得られるばかりでなく、慣性力利用方式では得られない静的制御力も得られるので、超々高

* 原稿受付 1997年4月21日。

^{*1} 学生員, 日本大学大学院 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8)。^{*2} 正員, 日本大学理工学部。

層化したビルの風による揺れの制御に有効なばかりでなく、大地震に対しても有効であると考えている。今までに著者らは本方式を実現させるための基礎研究とした、二連⁽²⁾ および三連⁽³⁾ 柔軟構造物の低次元モデル作成に基づく振動制御法を研究し、おもに風による振動に対しての本手法の有効性の検証のため、インパルス加振による制振効果を検証してきた。

本報では、地震に対する本手法の有効性を検証することを目的としている。振動制御にはフィルタ LQ 制御理論を使用し、ロバスト性を高めるために 2 種類のフィルタを用いる。一つは低次元化モデル作成の段階で無視する高次モードの影響を抑えるためのアクチュエータとセンサ配置を考慮した構造的フィルタ、他はさらに高次モードのもたらすスピルオーバー不安定を防止するソフトウェアフィルタである。シミュレーションによる数値解析と制御対象構造物を実際に気象庁神戸観測所で測定された地震波を用いて加振し、本手法の有効性を検証する。加えて、制御系設計時の設計パラメータである重み係数行列の決定法についても考察する。

2. 構造物の低次元モデル化モデル作成

図 1 に本報での制振対象である二つの並列する柔軟構造物の概要図を示す。並列構造物の低次元化モデルは、まず並列構造物をそれぞれ独立した構造物と考え、「不可制御、不可観測性を活用した低次元化モデル作成法」⁽⁴⁾を用いて、各構造物の低次元化物理モデルを作成する。ここで簡単に低次元化モデル作成法について説明する。

Fig. 1 Outline of flexible structures arranged in parallel to be controlled

まず、実験モード解析や FEM 解析などにより、構造物の振動モード形を求める。次に低次元化のために無視した非モデル化モードの振動の節を質点とする集中定数系モデルを作成し、その点における制御対象モードのモード成分を読み取り、仮のモード行列を作成する。最後に感度解析法を応用したモード行列の修正を行い、集中定数系の物理量を求める。図 2 に各構造物の 1 次から 5 次までの振動モード形を示す。本報では、実験モード解析によりモード形を求め、制御対象モードを 1 次から 3 次の振動モードとして、各構造物の三自由度系モデルを作成する。質点の位置は、非モデル化モードの最低次モードである 4 次の振動モードの節とする。これより四次モードは不可制御、不可観測が実現できるので、同モードによるスピルオーバーを防止できる。このような考え方を構造的フィルタと呼んでいる。

また質点の位置における固有モード成分を行列の成分にもつ固有モード行列を定義する。そしてモード質量が単位行列となるように正規化し、これを新たに固有モード行列 Φ とし、また固有振動数を対角要素にもつ周波数行列を Ω と Φ を用いると、質量行列 M 、剛性行列 K は以下のように表せる。

$$M = (\Phi \Phi^T)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

$$K = (\Omega^2)^{-1} \Phi^T \Phi^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

しかしここで算出される質量行列は、一般に対角行

(a) Structure 1

(b) Structure 2

Fig. 2 Vibration mode shapes of each structure

Fig. 3 Physical model with actuators and parameters

列にはならない。そこで集中定数系の条件を満足させるために、誤差関数 ϵ を定義し、これを零にするように固有モード行列 Φ に修正を行う。固有モード行列に対する誤差関数の感度行列 $[\partial\epsilon/\partial\Phi]$ を、修正量を $\delta\Phi$ とすると、誤差関数を零とする修正量は次式で求められる。

$$\delta\Phi = \left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\Phi} \right]^T \left\{ \left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\Phi} \right] \left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\Phi} \right]^T \right\}^{-1} (-\epsilon) \quad \dots\dots\dots (3)$$

この修正量を用いて誤差関数を零に収束させれば、集中定数系の条件を満たす固有モード行列が得られる。

$$X_f = \{\dot{X}_1 \dot{X}_2 X_1 X_2\}^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$X_c = \{\dot{X}_{11d} \dot{X}_{12d} \dot{X}_{13d} \dot{X}_{21d} \dot{X}_{22d} \dot{X}_{23d} X_{11d} X_{12d} X_{13d} X_{21d} X_{22d} X_{23d}\}^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 X_{11d} は M_{11} における地面に対する相対変位である。また、フィルタの係数行列 A_f, B_f 、および制御対象の係数行列 A_c, B_c は以下のようにになっている。

$$A_f = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_n & 0 & \omega_n^2 & 0 \\ 0 & -2\zeta\omega_n & 0 & \omega_n^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} \omega_n^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_n^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad A_c = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_{11}} & 0 & 0 & \frac{1}{M_{21}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_{12}} & 0 & 0 & \frac{1}{M_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Fig. 4 Block diagram representation of expanded system

これを用いて新たに式(1), (2)に代入して本モデルの質量行列 M 、剛性行列 K を算出する。図3に二・三自由度系に低次元化された構造物と二つのアクチュエータからなる力学モデルと修正を施した各物理パラメータを示す。

3. 並立弾性構造物モデルの 状態方程式の作成

2章で作成した集中定数系モデルに基づいて状態方程式を作成する。また、制御対象外の四次モードよりもさらに高次モードによるスプilloーバに対する補償として、ここでは二次系のローパスフィルタを用いる。さらにフィルタへの入出力間の位相ずれも考慮し、フィルタをソフトウェアで構成し、フィルタの状態ベクトルもフィードバック系に組み込み設計を行う。図4には制御対象とフィルタを結合した拡張系の状態方程式のブロック線図を示す。ここに、ローパスフィルタと制御対象の状態ベクトルは式(4), (5)のようになっている。

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{M_{11}} & 0 & 0 & \frac{C_1}{M_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_2}{M_{12}} & 0 & 0 & \frac{C_2}{M_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{C_1}{M_{21}} & 0 & 0 & -\frac{C_1}{M_{21}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_2}{M_{22}} & 0 & 0 & -\frac{C_2}{M_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{10}+K_{11}+K_{15}}{M_{11}} & \frac{K_{11}}{M_{11}} & \frac{K_{15}}{M_{11}} \\ \frac{K_{11}}{M_{12}} & -\frac{K_{11}+K_{12}+K_{14}}{M_{12}} & \frac{K_{12}}{M_{12}} \\ \frac{K_{15}}{M_{13}} & \frac{K_{12}}{M_{13}} & -\frac{K_{12}+K_{13}+K_{15}}{M_{13}} \end{bmatrix}$$

$$a_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{20}+K_{21}+K_{25}}{M_{21}} & \frac{K_{21}}{M_{21}} & \frac{K_{25}}{M_{21}} \\ \frac{K_{21}}{M_{22}} & -\frac{K_{21}+K_{22}+K_{24}}{M_{22}} & \frac{K_{22}}{M_{22}} \\ \frac{K_{25}}{M_{23}} & \frac{K_{22}}{M_{23}} & -\frac{K_{22}+K_{23}+K_{25}}{M_{23}} \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = I(6 \times 6), \quad A_{22} = 0(6 \times 6), \quad a_{12} = a_{21} = 0(3 \times 3)$$

このブロック線図から拡張系の状態方程式を導くと式(6)のようになる。

$$\dot{X} = AX + BU \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、状態ベクトルと係数行列は以下のようになる。

$$X = \{X_f X_c\}^T, \quad A = \begin{bmatrix} A_f & 0 \\ B_c C_f & A_c \end{bmatrix}, \quad B = [B_f \quad 0]^T$$

4. 制 御 系 設 計

4.1 LQ制御理論による制御系設計 制御系設計にはLQ制御理論を用いる。設計パラメータは、以下に示す線形二次形式の評価関数 J に与える重み係数行列 Q, R である。ただし、 Q は状態ベクトルに、 R は制御量に掛かる重み係数行列である。

$$J = \int_0^\infty (X^T Q X + U^T R U) dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

LQ制御理論に基づけば、この評価関数 J を最小にする制御量 U は式(7)のように定式化されており、リカッチ方程式の解 P を求めることにより拡張系の最適フィードバックゲイン K が決定できる。

$$U = U_f = -R^{-1} B^T P X = -K X \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 K は以下のようにフィルタと制御対象に掛かるフィードバックゲイン行列からなっている。

$$K = [K_f \quad K_c]$$

そこで、どのような重み係数行列を設定すれば並列構造物に対する良好な地震応答制御が可能になるか調べるのが本研究の課題である。

4.2 準最適制御理論による制御系設計

本報では構造物の構造的な制約によりセンサの設置位置が制限されることを考慮し、準最適制御理論⁽⁵⁾⁽⁶⁾を適用する。ここでは、制御対象の構造物の一番下の質点の状態量が観測できないと状況を仮定した。

LQ制御理論を適用する際の状態ベクトル X は16個の状態量によって構成されていた。しかし仮定に基づけばセンサの設置制約によって、観測可能な状態量が12個である。そこで観測できない状態量を除いた状態ベクトルを Z とし、制御構造制約行列 M を用いて以下のような線形変換を行う。

$$Z = M X \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$Z = \{\dot{X}_1 \dot{X}_2 X_1 X_2 \dot{X}_{11d} \dot{X}_{12d} \dot{X}_{21d} \dot{X}_{22d} X_{11d} X_{12d} X_{21d} X_{22d}\}^T$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

この状態ベクトル Z によりフィードバックを構成すると、

$$U = -HZ = -HMX = -K_s X \dots\dots\dots (10)$$

ここに準最適フィードバックゲインベクトル K_s は以下のように定式化されている。

$$K_s = KM^T(MM^T)^{-1}M \dots\dots\dots (11)$$

すなわち LQ 制御におけるフィードバックゲインベクトル K を準最適フィードバックゲインベクトル K_s に置き換えることで、準最適フィードバックが実現できる。

5. シミュレーションによる 制振効果の確認

5・1 根軌跡図を用いた重み係数行列の決定 本報では、制御系設計パラメータである重み係数行列 Q を根軌跡図を用いて、制御系の特性をつかみ決定した。制御対象を二-三自由度系低次元化モデルを作成したので、ローパスフィルタの状態量への重みを考えないとすれば、状態量への重み係数行列 Q は 12 個、制御量への重み係数行列 R は 2 個となるので、合計 14 個の設計パラメータを設定しなければならない。しかし Q に関しては、状態量の速度項に重みを掛けた場合のほうがすべてのモードに対して高い制振効果が得られることがわかっている⁽⁷⁾、まず速度項にのみ重みを掛けた場合について考える。図 5 に以下の 2 種類の重み係数行列を用いたときの構造物 1 と 2 の各モードの極配置を示す。ここに、 $\delta\zeta_1, \delta\zeta_2, \delta\zeta_3$ はおのおの一次、二次、三次モードの構造物 1 と 2 の減衰率の差を示している。

$$Q = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$Q = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

なお Q の重みによる根の特性の比較のため制御量への重み係数行列 R はともに $R = \text{diag}[5e-4 \ 8e-4]$

Fig. 5 Root placement in case of the weighting velocity

とした。この図より速度項のみに重みを掛けた場合、各重み係数行列を適切に設定することで、左右の構造物の各モードの根の減衰率の差 $\delta\zeta$ を少なくすることができる。つまり左右の構造物に同等の減衰率が得られることとなり、したがって左右の構造物への同等の制振効果が期待される。また一次モードの根を比較すると $\times$ の重み係数行列の方が制振効果が高いことが期待される。

次に速度項だけでなく変位項にも同時に重み係数を掛けた場合について考える。図 6 に速度項のみ重みを掛けた場合と速度項のみではなく変位項にも同時に重みを掛けた場合を比較した根軌跡図を示す。この図より、特に構造物 2 の一次モードの根が左に大きく動いていることが確認される。つまり、剛性の低いほうの構造物の一次モードの減衰が強くなることが期待される。地震応答では、剛性の低い構造物が大きな振幅をもつため、この構造物の一次モードの減衰を大きくす

Fig. 6 Comparison with root placements in case of the weighting velocity and displacement

Fig. 7 Simulated frequency responses

ることが重要なので、本報では Q, R は以下のように決定した。

$$Q = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 2 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \\ 100 \ 100 \ 100 \ 1 \ 000 \ 1 \ 000 \ 1 \ 000]$$

$$R = \text{diag}[5e-4 \ 8e-4]$$

5.2 周波数応答 以上のように決定した重み係数 Q, R の妥当性を周波数応答によって確認するため

Fig. 8 Simulated results of time response on each structure when the earthquake wave with 3 Hz of outstanding frequency is used

Fig. 9 Simulated results of time response on each structure when the earthquake wave with 6 Hz of outstanding frequency is used

に行ったシミュレーションの結果を図7に示す。構造物1, 2ともに一次, 二次モードがよく制御されていることがわかる。さらに, 各構造物に取付けられたセンサの数は二つであるにもかかわらず, 準最適制御の効果で三次モードも抑制されている。

5.3 地震応答 次に, このような周波数応答に制御された並立構造物のもつ地震応答効果について調べる。図8は剛性の低い構造物2の一次モードの固有振動数3 Hz付近に地震波の卓越周波数が一致したと仮定して, シミュレーションによる各質点の絶対変位の応答を示す。用いた地震波は気象庁神戸観測所で観測された東西波である。上段に地震波の変位波形, 中, 下段に構造物1, 構造物2の質点1の変位応答を示す。同様に, 図9は剛性の高い構造物1の一次モードに合わせて約6 Hz卓越周波数を設定して加振した応答を示す。

また, 細線が非制御時, 太線が制御時の応答である。各図より共振を起こしている構造物が制御によって速やかに収束しており, これより本制御手法が地震に対して高い制御効果があることをシミュレーションより確認することができる。

6. 振動制御実験

6.1 実験装置の構成 図10に実験装置の構成を示す。実験装置は, 四次モードを不可制御, 不可観測

Fig. 10 Configuration of experiment setup

Fig. 11 Construction of actuator

Fig. 12 Measured frequency responses

Fig. 13 Experimental results of time response on each structure when the earthquake wave with 3 Hz of outstanding frequency is used

モードに選び、このモードの最上部と中央部の節と、地動の変位の検出のために、各構造物におのおの三つのレーザ変位センサを取付け、各点の絶対変位を検出し、A/D変換器を介してコントローラであるDSPに入力した。DSP内では、質点の変位と地動の変位の差を取り、相対変位を作る。そしてこれを差分し、速度信号を計算し、状態ベクトルを構成する。この状態ベクトルにコンピュータによって計算されたフィードバックゲインを乗ずることで、二つの制御量をそれぞれ算出する。この制御量は電流増幅器を介して二つのアクチュエータを駆動し、振動制御を実行する。アクチュエータは図11に示すとおり、コイルと永久磁石からなる非接触の電磁力タイプであり、コイルに巻い

Fig. 14 Experimental results of time response on each structure when the earthquake wave with 6 Hz of outstanding frequency is used

たアルミニウムケースと永久磁石との間の渦電流損失よりパッシブ制御力も得るハイブリッド形のものである。

6・2 実験結果 シミュレーション結果を検証するために、同じ条件でインパルス加振したときの周波数応答を図12に示す。レーザ変位計の分解能が低いために、低い振幅でノイズが乗っているが、シミュレーション結果と一致していることがわかる。無視した高次モードのスピルオーバーが発生していないことも注目されたい。

またシミュレーションと同様に、約3 Hzに卓越周波数が位置するように神戸地震波を整形した波形を入力したときの地震応答を図13に示す。上段は入力変位波形、中段は構造物1、下段は構造物2の変位応答である。

図14には6 Hzに地震波の卓越周波数が一致するようにし、並立構造物を加振した場合の実験による応答を示す。シミュレーションと同様、共振を起こしている構造物を速やかに収束させていることがわかる。特に注目すべきは、神戸地震波が発生直後に鋭利な変位波が発生しているのに対し、各構造物が初期段階から制御されていることである。これはパッシブ制御では不可能なことであり、本地震応答制御法が持つ大きな特長といえよう。以上のように、本制御手法が、地震に対しても高い制振効果があることが実験において検証された。

7. 結 論

以上のような数値解析, 実験結果から以下のような結論を得た.

(1) 著者らが提案している「不可制御, 不可観測性を活用した低次元化モデル作成法」により, 並立する二つの構造物を低次元化し, このモデルを基に本報で提案する振動制御法を用いれば, 並立する弾性構造物の複数の振動モードをスピンオーバーを起こすことなく制御できることが実証された.

(2) 制御系設計のパラメータである Q, R の設定の際, 根配置図を用いて制御系の特性を見いだせば, 地震波の初期段階から構造物の地震応答をよく制御できる.

(3) シミュレーションと実験結果はよく一致しており, あらかじめシミュレーションで地震応答制御の制御則を見いだしておけば, 実際の構造物の制御に有効である. また, 本制御手法が地震応答制御に有効であることが模型実験で実証できた.

最後に, 本実験にあたりは卒業研究生小林賢氏(現: キヤノン化成)の熱心な協力があつたことを記して謝意を表す.

文 献

- (1) 背戸一登, 振動のアクティブ制御, 日本音響学会誌, **47**-9(1991), 668-677.
- (2) 背戸一登・ほか3名, 並立する弾性構造物のモデル化法と振動制御法(超々高層ビル実現のための基礎研究), 機論, **61**-585, C(1995), 1899-1905.
- (3) 富波佳均・背戸一登・ほか2名, 三連弾性構造物の振動制御(超々高層ビル実現のための基礎研究, 機論, **62**-599, C(1996), 2561-2598.
- (4) 背戸一登・光田慎治, 不可制御・不可観測性の活用による弾性構造物の低次元化物理モデル作成法と振動制御法, 機論, **57**-542, C(1991), 3393-3399.
- (5) Kosut, R.L., Suboptimal Control of Linear Time-Invariant Systems Subject to Control Structure Constraints, *IEEE Trans.*, AC-15-5(1970), 557-563.
- (6) 吉田和夫・野波健蔵, 振動と運動の制御手法の展望, 機論, **57**-534, C(1991), 345-354.
- (7) 江連勝彦・富波佳均・背戸一登, 多自由度系モデルによる隣接する弾性構造物の準最適制御, 機論, **63**-610, C(1997), 1901-1908.