モードセンサ・圧電アクチュエータによる積層板の振動制御*

菅原 香織^{*1}, 福永 久雄^{*2}
亀山 正樹^{*2}, 胡 寧^{*1}Active Vibration Control of Laminated Composite Plates
Using Modal Sensors and Piezoelectric ActuatorsKaori SUGAWARA, Hisao FUKUNAGA^{*3},
Masaki KAMEYAMA and Ning HU^{*3} Department of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University,
01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper deals with an active vibration control of a laminated composite plate with piezoelectric actuators/sensors under dynamic loading. PVDF films are used as a modal transducer for identifying specific modes in vibration measurement, and PZT actuators are used as actuators of vibration control. An optimal control law for each control mode is applied to the vibration control of a cantilevered laminated plate. Numerical simulation on vibration control is performed for a cantilevered laminated plate based on a finite element analysis incorporating the stiffness and mass effect of actuators. The effectiveness of the present methodology is verified by several numerical examples.

Key Words: Piezoelectric Actuator, Modal Sensor, Feedback Control, Composite Structure

1. 緒 言

宇宙構造物に適用される複合材構造は、大型化・軽量化に伴い柔軟で励振されやすく、かつ減衰特性が悪いため、アクティブな振動制御が必要となる。複合材構造は軽量・高比剛性・高比強度の特性に加え、アクチュエータやセンサを構造に貼付あるいは埋込むことが容易であるため、知的複合材構造⁽¹⁾⁽²⁾の研究が活発に行われている。

複合材構造に貼付あるいは埋込むことが容易なアクチュエータやセンサとして、PZT 圧電アクチュエータやポリフッ化ビニリデン(PVDF)圧電センサが注目を集めている。PZT 圧電アクチュエータは、変形量は小さいが小型で応答速度が速く、柔軟軽量構造物の振動制御用アクチュエータとして優れている。圧電アクチュエータによる振動制御に関して、フィードバック制御則に基づいて⁽³⁾⁽⁴⁾、アクチュエータの配置や形状決定問題等の多数の研究が報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。一

方、振動計測センサとして、PVDF は、弾性的で柔軟性に富み、また衝撃に強く、いろいろな形への成形が可能な利点がある。この圧電センサは後処理が簡単でスピルオーバーを起こしにくいモードセンサとして用いることが可能である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。さらに、圧電アクチュエータを用いてモードごとに分離した制御を行うことで、他のモードを励振しないで安定した制御が可能であることから、近年、モードセンサ・モードアクチュエータの研究が進展している。Lee ら⁽⁹⁾は、圧電材料をモードセンサとして適用する場合の設計方法を提案し、はり構造に対するモードセンサの構築法を示している。また、板構造に対しては、単純な境界条件⁽⁹⁾以外のときにモードセンサを構築することが困難であったが、文献(10)では板構造についてのモードセンサ構築法に関する検討を行っている。従来、モードセンサの構築法として、センサ形状を最適化する方法がおもに用いられてきた。この方法は、形状最適化を有効に行うことができれば少ないセンサ数でモード変位を計測できる利点があるが、構造物のモデル化誤差の影響を受けやすい欠点がある。一方、センサ形状を固定して、センサゲインを最適化することによりモードセンサを構築することも可能であり、文献(10)で予備的検討が行われている。本研究では後者のセンサゲインの最適

* 原稿受付 2001 年 4 月 20 日。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)。^{*2} 正員、東北大学大学院工学研究科。

E-mail: fukunaga@ssl.mech.tohoku.ac.jp

化によるモードセンサ構築法を詳細に検討する。この方法では、粗いセンサゲイン分布をモデルにより求めておけば、実際の構造物のモーダル試験によってセンサゲインを調整できるため、モデル化誤差の影響を受けにくい利点がある。

このようなモードセンサを用いて応答変位を計測し、それをもとに振動制御を行っている研究も見られるが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、知的複合材構造についてセンサゲインの最適化に基づくモードセンサの構築法と振動制御への適用研究はまだほとんど行われていない。そのため、種々の積層構成についてのモードセンサの構築法および有効な振動制御の方法についての検討が必要な段階にある。

本研究では、片持積層板に圧電アクチュエータ・圧電センサを貼付した知的複合材構造を対象に、振動制御についての検討を行う。最初に、応答変位の計測のためのモードセンサの構築法について検討し、次に、得られたモード変位に対し LQR 制御に基づくフィードバック制御則を適用し振動制御を行う。振動計測・制御における一連の処理について、数値シミュレーションを通してその有効性を検討する。

2. モードセンサ

2.1 FEM を用いた振動制御の定式化 本研究では図 1 に示すように、制御対象として圧電アクチュエータ・圧電センサを貼付した板厚一定の片持 CFRP 対称積層板を考える。この知的複合材構造は、4 節点 12 自由度の四辺形曲げ要素からなる有限要素モデルを用い解析する。図 1 中の番号は要素番号であり、アクチュエータおよびセンサは、図 1 のように基板の上下面に対し対称に貼付する。なお、センサには軽量かつ柔軟な PVDF フィルム、アクチュエータには PZT を考え、それぞれの材料定数は表 1 に示すとおりである。有限要素モデルでは、圧電アクチュエータの質量および剛性を考慮する。一方、圧電センサは軽量で薄いため、その剛性・質量とも無視する。

圧電アクチュエータへ電圧を印加することにより基板に対して曲げモーメントが発生する。図 1 に示す積層板のフィードバック振動制御におけるモード座標系での基礎式は次式のように表される。

$$\ddot{\alpha}(t) + 2Z\Omega\dot{\alpha}(t) + \Omega^2\alpha(t) = \Phi^T Du_c(t) = f_{mc}(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\alpha(t) = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_m)^T$ はモード変位ベクトル、 $\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m)$ は固有振動モード行列であり、 $Z = \text{diag}[\zeta_1 \ \zeta_2 \ \dots \ \zeta_m]$ 、 $\Omega = \text{diag}[\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_m]$ (ζ_i , ω_i は i 次のダンピングおよび固有角振動数) はダンピン

Table 1 Material properties

CFRP				
E_L [GPa]	E_T [GPa]	G_{LT} [GPa]	ν_L	ρ [kg/m ³]
98.0	7.90	5.60	0.28	1520

PZT			PVDF Film	
E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	d_{31} [pm/V]	e_{31}, e_{32} [C/m ²]
63.0	0.3	7700	265	0.046

Fig. 1 Finite element model

グおよび固有角振動数を表す対角行列である。また、 $f_{mc}(t)$ はモード座標系での制御力ベクトル、 u_c は印加電圧ベクトル、 D はあるアクチュエータに単位電圧を印加したときの各節点での制御力を表す行列である。なお $\cdot$ は時間微分、 m は構造の全自由度を表している。

このモード座標系で表現される式 (1) をもとに振動制御を行うが、その際、構造系の応答変位を迅速に精度良く計測することが必要不可欠となる。

2.2 モードセンサ構築の定式化 本研究では制御対象である片持積層板の応答変位の計測として、PVDF を用いたモードセンサの構築を行う。PVDF センサでは、センサを貼付した場所のひずみに対応する電荷(あるいは電圧)を発生する。特に、モードセンサはある特定のモード変位をピックアップするセンサであり、構造物の変形に伴い電荷を発生する。

このとき板全体で発生する電荷は式 (2) で表される。

$$q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) x_i = u(t)^T Q x = a(t)^T \Phi^T Q x \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、式中の $q_i(t)$ は i 番め要素 ($i=1, 2, \dots, n$) の電荷を表し、センサゲインによって x_i 倍に増幅される。 $q_i(t)$ を全体座標系で表すことにより、板全体で得られる電荷 $q(t)$ は全要素分の和で与えられる。式 (2) では、電荷を節点変位ベクトル $u(t)$ 、センサ行列

Q , さらに固有振動モード Φ を用いて表している⁽¹⁰⁾.

式(2)において, 低次の k 次モードのみをピックアップするモードセンサを構築する. このとき, 計測したいモード以外の他のモードと直交しつつ, かつ k 次のモードセンサとして得られる電荷を最大となるようなセンサゲインを求める問題は, 以下のように定式化できる⁽¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \Phi_k^T Q x_k \\ & \text{subject to} \quad \Phi_l^T Q x_k = 0 \quad x_k^T x_k = 1 \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

式(3)の Φ_l は, k 次の固有振動モード Φ_k を除いた低次分で構成されるモード行列である. また, センサゲインベクトルは $x_k = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$ である.

式(3)の最大化問題は, 式(4)の固有値問題に置き換えることができ, センサゲインは式(4)の固有値問題の最大固有値に対応する固有ベクトルで与えられる.

$$(\Psi^T Q^T \Phi_k \Phi_k^T Q \Psi) x_{k2} = \lambda (\Psi^T \Psi) x_{k2} \quad \dots\dots (4)$$

ここで, $x_k = (x_{k1}, x_{k2})^T$ であり, $\Phi_l^T Q x_k = 0$ より x_{k1} を消去すると, $x_k = \Psi x_{k2}$ と表される.

式(2), (4)よりモード変位は次式で表される.

$$a_k(t) = \frac{q(t)}{\Phi_k^T Q x_k} \quad \dots\dots (5)$$

以上により, PVDF フィルムを用いて片持積層板のモード変位を計測できる.

2・3 モードセンサの構築例 本節では, 有限要素法によるシミュレーションを用いてモードセンサの有効性を検討する. シミュレーションでは, 応答変位

は 10 次までの固有振動モードの和で表す. この 10 次までのモードのうち, 計測するモード以外の九つのモードすべてを直交化してモードセンサを構築した.

CFRP 90° 片持一方向板について, アクチュエータ貼付がない状態でのモードセンサ例を図 2 に示す. ここで, 解析モデルの横方向に 6 分割(①~⑥), 縦方向に 2 分割(a, b)の 12 領域における 1~3 次モードの

Table 2 Values of sensor gain

	mode 1		mode 2		mode 3	
	a	b	a	b	a	b
①	-7.4339 E-02	-7.4341 E-02	6.1958 E-01	-6.1960 E-01	1.2208 E-02	1.2205 E-02
②	3.0355 E-01	3.0355 E-01	2.4448 E-01	-2.4444 E-01	2.2125 E-02	2.2133 E-02
③	-4.3851 E-01	-4.3852 E-01	8.7625 E-02	-8.7594 E-02	-2.2674 E-01	-2.2675 E-01
④	3.9370 E-01	3.9370 E-01	7.3611 E-02	-7.3759 E-02	4.6686 E-01	4.6685 E-01
⑤	-2.2598 E-01	-2.2597 E-01	4.5836 E-03	-4.4150 E-03	-4.4868 E-01	-4.4867 E-01
⑥	6.3027 E-02	6.3024 E-02	-2.0793 E-01	2.0786 E-01	1.6936 E-01	1.6935 E-01

Fig. 3 Loading condition

Fig. 4 Displacements of 1st-3rd modes

Fig. 2 Distribution of sensor gain for $[90_3]$

センサゲイン分布を表している。図2ではセンサゲインの値の絶対値が大きいほど濃い色になるように色分けしており、またその符号は図2中に示している。図2からわかるように、1, 3次(曲げ1次, 曲げ2次)は中心線から上下対称の形状, また2次(ねじり1次)は中心線の上下で符号が逆のねじれた形状が得られている。このときの各モードに対するセンサゲインの値を表2に示す。

このセンサゲイン分布のとき, モードセンサによる片持積層板の応答変位結果を調べる。図3のケース1の一定荷重を荷重点(91番節点)に負荷した後の除荷後の自由振動応答を図4に示す。なお, 式(5)におけるモードダンピングとして, $\zeta_i=0.01$ を用いている。

図4には1~3次の正解のモード変位を破線で, モードセンサによって得られた変位を実線で示している。図4より1~3次ともに, 両者の値が完全に一致する結果が得られており, モードセンサにより正しく応答が計測されていることがわかる。

3. フィードバック制御系の設計

3.1 モード座標系でのLQR制御則と制御入力
圧電アクチュエータを図1のように積層板の上下面で対称に貼付し, 電圧の印加により基板に対して曲げモーメントを発生させ振動制御を行う。ここではLQR制御に基づくモードごとに分離したフィードバック制御則を適用する。式(1)に対するフィードバック制御則を式(6)のように与える。

$$f_{mci}(t) = -(G_{mpi} \ G_{mvi}) z_i(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, $z_i(t) = (\alpha_i(t), \dot{\alpha}_i(t))^T$ である。式(6)の G_{mpi} , G_{mvi} はそれぞれ i 次モードの変位, 速度に対するフィードバックゲインであり, 式(6)によって i 次モードに対する制御力 $f_{mci}(t)$ が決定される。

フィードバックゲインは式(7)で表現される二次形式評価関数を最小とするように決定する。

$$J_i = \int_0^\infty (z_i^T Q_i z_i + f_{mci}^T R_i f_{mci}) dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の Q_i , R_i はそれぞれ $Q_i = [\omega_i^2 \ 1]$, $R_i = [r_i]$ であり, r_i は i 次モードの制御力に対する重みとなっている。この式(7)は, 第1項が運動エネルギーおよびひずみエネルギーの和であり, 第2項は制御入力の二乗和を表している。式(7)を最小とするようなフィードバックゲインは, リカッチ方程式を解くことにより求められ, ゲインは次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$\begin{aligned} G_{mpi} &= \omega_i \sqrt{\omega_i^2 + r_i^{-1}} - \omega_i^2 \\ G_{mvi} &= \sqrt{(2\zeta_i \omega_i)^2 + 2G_{mpi} + r_i^{-1}} - 2\zeta_i \omega_i \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

このフィードバックゲインを用いて, i 次モードに対

する制御力 $f_{mci}(t)$ が式(6)から決定される。

次に得られた制御力から圧電アクチュエータを駆動するための印加電圧を求める。印加電圧を決定する際は式(1)の関係を基に求めるが, このとき制御するモード次数とアクチュエータ個数によって, 印加電圧の求め方が異なる。両者の数が一致している場合, 圧電アクチュエータの印加電圧は次式で与えられる。

$$u_c(t) = (\Phi^T D)^{-1} f_{mc}(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

一方, 制御するモード次数よりもアクチュエータ個数が少ないときは, i 次モードの制御に対して以下のような最小二乗法を用いて印加電圧を決定することになる。

$$u_c(t) = \{(\Phi^T D)^T (\Phi^T D)\}^{-1} (\Phi^T D)^T f_{mc}(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで, $f_{mc}(t) = (0 \ 0 \ f_{mci}(t) \ 0 \ \dots \ 0)^T$ である。式(9)あるいは(10)を用いてアクチュエータ印加電圧を決定する。

3.2 数値計算例 上記制御則を積層板に適用し, その制御効果について検討する。

図5にアクチュエータ貼付位置を薄黒で示す。振動

Fig. 5 Location of PZT actuators

Fig. 6 Displacement at 91 st node for Case 1

Fig. 7 Displacement at 91 st node for Case 2

制御においてはアクチュエータ配置が重要なことはよく知られており、曲げ1次・曲げ2次の振動を同時に制御するためには板の長手方向にアクチュエータを配置することが有効であり、曲げ1次とねじり1次を制御するためには固定端近くの板の幅方向にアクチュエータを配置することが有効となる⁽¹³⁾。そこで、本研究ではできるだけ少ないアクチュエータで低次の振動モードを同時に制御するために、図5の二つの配置を考える。 $[90_3]_s$ の一方向板について、モデル1のアクチュエータ配置を有するときのモードセンサを構築し、図2と同様に12領域でのセンサゲイン分布を求める。図3の荷重ケース1, 2について、このモードセンサにより応答変位の計測を行い、上記制御則を適用し振動制御を行う。ケース1, 2ともに、一定荷重下の強制振動の後、除荷したときの自由振動の制御を行う。荷重ケース1, 2に対する制御結果を、制御力に対する重みをパラメータとして図6, 7に示す。両図はケース1の荷重点(91番節点)での変位を表している。

荷重ケース1では、一次モードに加え二次が、ケース2では一次モードに加え三次が励振されるような荷重が負荷されている。そこで、低次の二つのモードを制御することにし、荷重ケース1では1次と2次を、ケース2では1次と3次を制御している。例えば、ケース1の場合は、制御する一次と二次モードの制御力は式(6)の f_{mci} を用い、3次と4次の制御力を零として、式(9)より圧電アクチュエータの印加電圧を決定する。

図6, 7からわかるように、どちらの荷重ケースについても高い制振効果が得られている。このようにモードごとに分離したフィードバック制御則を用いることにより、効果的に振動制御を行うことが可能となる。また、両図より、式(7)の重みが小さいほどその制御効果が高くなることがわかる。重みが小さいとき式(7)の制御量の拘束が小さくなり、大きな制御力を使用できるためである。

次に、積層構成が $[45/90_2]_s$ のときの振動制御結果を示す。荷重条件は図3のケース1を、またアクチュエータ貼付位置は図5のモデル1とモデル2を用いた。両モデルに対するモードセンサを構築し、同様の振動制御を行い、その制振効果の比較を行う。なお、異方性の強い $[45/90_2]_s$ 積層板では、センサゲイン分布は $[90_3]_s$ 直交異方性板の場合のように板の中心線に対して上下対称あるいは上下逆対称の簡単な分布を示さず、複雑な分布となる⁽¹⁴⁾。先程と同様、1次および2次を制御対象とする。モデル1はアクチュエータに対する印加電圧の自由度が4であることから、3次と

Fig. 8 Displacement at 91 st node (Model 1)

Fig. 9 Displacement at 91 st node (Model 2)

4次の制御力を零として印加電圧を決定する。図8の制御結果に示すように、高い制御効果が得られていることがわかる。

一方、モデル2では、少ないアクチュエータで多くのモードを制御することが可能かどうかを調べるため、4次までのモードについて、式(10)の最小二乗法により印加電圧を決定した。制御結果を図9の実線で示すが、ほとんど制御されていないことがわかる。これは最小二乗解の精度が悪く、式(6)のフィードバック制御則で要求される制御力に比べ、小さな制御力しか発生できないために制御効果が悪化している。

振動制御問題において、高次成分は振幅が小さく、また減衰が速いことから、低次成分のみを考慮して制御する場合が多く見られる。そこで、モデル2において、制御モードである1次および2次の二つのモードのみを考慮して式(9)を用いて制御した結果を図9中の一点鎖線で示す。これを見ると、2次までしか考慮していないにも関わらず、図8に示したモデル1の場合と比較しても遜色ない制御が可能となっていることがわかる。

4. 観測スビルオーバーに関する検討

振動制御においては、できるだけ少ない数のセンサ・アクチュエータにより計測・制御することが望ましい。一方、式(5)において、限られたセンサゲイン

Table 3 Values of sensor gain (6 regions)

	mode 1		mode 2		mode 3	
	a	b	a	b	a	b
①	4.7793 E-01	4.7793 E-01	-6.9123 E-01	6.9123 E-01	-3.2564 E-01	-3.2564 E-01
②	4.2000 E-01	4.2000 E-01	-1.4858 E-01	1.4858 E-01	5.3957 E-01	5.3957 E-01
③	-3.0852 E-01	-3.0852 E-01	4.8594 E-04	-4.8594 E-04	-3.2065 E-01	-3.2065 E-01

Fig. 10 Modal displacements of 1st-2nd modes

の自由度を用いて、多くのモードを完全に直交化することは不可能である。このとき、直交化されなかった高次のモード変位は、計測の際消えずに残る。すなわち、モード変位は式(11)のように正解値と誤差の和で表される。

$$\bar{a}_k(t) = \frac{\phi_k^T Q x_k a_k(t)}{\phi_k^T Q x_k} + \sum_{i=l+1}^n \frac{(\phi_i^T Q x_k) a_i(t)}{\phi_k^T Q x_k} \quad \dots\dots\dots (11)$$

そこで、今回採用している十次モードまでのうち、直交化する次数 l を4次までとし、計測モード変位に対する高次項の影響を検討する。[90]₃の一方方向板について、アクチュエータ配置をモデル2としたときのモードセンサを構築する。その際に得られたセンサゲインの値を表3に示す。ただし、センサゲインは、横方向3分割、縦方向2分割の計6領域でのゲインの値である。この表から1, 3次で中心線の上下で対称、また2次では上下で符号が逆の結果が、アクチュエータを貼付することによっても得られているのがわかる。

このモードセンサを用いて図3の荷重ケース1に対するモード変位を図10に示す。破線が正解値、実線がモードセンサから得られたモード変位を表してい

Fig. 11 Displacement at 91st node (exact modal displacements)

Fig. 12 Displacement at 91st node (modal sensors and low-pass filter)

る。図10から、特に1次において、モードセンサの計測値に誤差が生じているのがわかる。これは直交性が保証されていない式(11)第2項の影響が大きくなることによって、高次項が大きく現れたものと考えられる。高次成分は減衰が速いため、特に前半でその誤差が大きくなっている。高次項の影響を無視してモードセンサの情報をそのまま用いてモード制御力を決定した場合、応答変位が発散してしまい振動を制御することが不可能であった。そのため振動制御において、高次モード成分の誤差の除去が必要となる。そこで本研究では、二次遅れ系で表現されるローパスフィルタを採用する。遮断角振動数は300[rad/s]とした。これは90°一方方向材の3次と4次の固有角振動数の間に相当する。

以下にローパスフィルタを用いた振動制御の数値例を示し、その有効性について検討する。図11に正解のモード変位を用いて制御した場合の荷重点での変位を、図12にモードセンサとローパスフィルタを組合せて制御した結果を示す。ここでは、一次と二次モードを制御している。これを見ると、正解値を用いて制御力を決定した場合とほぼ同等の制御結果が出ており、直交化の際に考慮する次数によって誤差が生じる場合においても、ローパスフィルタを用いることによ

り、効果的な制御が可能となっていることがわかる。しかしながら、二次遅れ系で表現されるローパスフィルタは取扱いが容易であるものの、その特性により時間遅れが生じるため、高次モードの観測および制御の際に注意を払う必要がある。

5. 結 言

本研究では、片持積層板を対象として、モード変位の計測にモードセンサ、制御系にフィードバック制御を適用して、圧電アクチュエータを用いた振動制御を行った。数値シミュレーションにより、次の結果が得られた。

(1) 数個の電極を有する PVDF フィルムのセンサゲインを設定することにより、積層板の低次のモード変位を計測するモードセンサを構築することができる。なお、本研究ではモードセンサのセンサゲイン設定を、構造物のモデルに基づいて解析的に行っているが、実用上はモーダル試験によって実験的に構築することが可能であり、積層構成や材料特性の変化にも対応できる。

(2) 各モードに分離されたフィードバック制御則により、圧電アクチュエータを用いて効率よく振動制御を行うことができる。このとき、モードセンサの観測スピルオーバーの原因となる高次項の影響を除去することが重要となる。

(3) モードセンサにおける高次項の誤差を除去するために、ローパスフィルタが有効であり、スピルオーバーを起こしにくい安定した制御が可能となる。

なお、今後の課題として、さらに効果的な応答計測、

制御を行うために、センサに関してはセンサ形状・大きさ・個数およびセンサ配置の最適化が必要であり、アクチュエータについても少ない個数で制御できる最適配置の検討が重要となる。また、高次分の誤差の除去についても、さらに精度の向上を検討する必要がある。さらに実験的検証が重要な課題として残されている。

文 献

- (1) Crawley, E. F. and Luis, J. D., *AIAA J.*, 25-10 (1987), 1373-1385.
- (2) Yang, S. Y. and Huang, W. H., *J. Sound Vib.*, 216-3 (1998), 529-538.
- (3) Devasia, S., Meressi, T., Paden, B. and Bayo, E., *J. Guidance, Control, Dynamics*, 16-5 (1993), 859-864.
- (4) Wang, Z., Chen, S. and Han, W., *Engineering Structures*, 21 (1999), 183-191.
- (5) Sunar, M. and Rao, S. S., *AIAA J.*, 34-10 (1996), 2209-2211.
- (6) Dimitriadis, E. K., Fuller, C. R. and Rogers, C. A., *J. Vib. Acoust.*, 113-1 (1991), 100-107.
- (7) Lee, C.-K., Chiang, W. and O'Sullivan T. C., *J. Acoust. Soc. Am.*, 90-1 (1991), 374-384.
- (8) Meirovitch, L. and Baruh, H., *J. Guidance*, 8-6 (1985), 707-716.
- (9) Lee, C.-K. and Moon, F. C., *J. Applied Mechanics*, 57-2 (1990), 434-441.
- (10) Kim, S. J., Ryou, J. K., Hwang, J. S. and Kim, J., *Proc. ACCM-1* (1998), 633-1-633-4.
- (11) Tzou, H. S. and Fu, H. Q., *J. Sound Vib.*, 172-2 (1994), 247-259.
- (12) Ryou, J. K., Park, K. Y. and Kim, S. J., *AIAA J.*, 36-2 (1998), 227-233.
- (13) 福永久雄・関根英樹・松野靖史, 機論, 63-608, A (1997), 801-807.
- (14) 菅原香織, 東北大学修士学位論文, (2001-2).