クラスタ制御による分布定数系構造物の振動制御について*

田 中 信 雄^{*1}, 菊 島 義 弘^{*1}Active Vibration Control of Distributed-Parameter Structure
Using Cluster Control

Nobuo TANAKA and Yoshihiro KIKUSHIMA

This paper considers the newly proposed cluster control of a distributed-parameter structure, which falls into a category of MAC (Middle Authority Control) in-between conventionally used LAC and HAC, thereby it possessing both the benefits of simple control structure by LAC and high control performance by HAC. First, from a viewpoint of feedback control, this paper clarifies the structure of a cluster control system, showing that it is possible to control a cluster independently without causing any influence onto other clusters. Experimental results show that cluster control is performed with sufficient control effect for suppressing targeted cluster of a distributed-parameter structure. With the aim of suppressing all structural modes of a structure, equivalent to suppressing all clusters, a design procedure for the cluster control system is proposed. Comparing with DVFB (Direct Velocity Feedback) widely used for active control of distributed-parameter structure, DVFB is found to be a special case of the cluster control.

Key Words: Vibration Modes, Distributed-Parameter Structures, Cluster Control, Cluster Filtering, Cluster Actuation, Eigenfunctions

1. 緒 言

分布定数系構造物の振動制御を困難なものとしている主原因は、無数に存在する振動モードにあるといえる。この問題に対するアプローチとして、基本的には LAC (Low Authority Control) / HAC (High Authority Control) 法⁽¹⁾ が考えられる。通常, LAC においては DVFB⁽²⁾ (Direct Velocity Feedback Control) が採用され, コロケーションが成立する制約下で広範囲な周波数領域にわたって振動モードにダンピングを付加することを主目的とする。これに対して, HAC においては, 通常はコロケーションが非成立な場合を対象として, 古くはオブザーバ/最適レギュレータ法⁽³⁾ や, 最近ではロバスト制御法⁽⁴⁾ を運用して, 狭帯域な周波数領域で限定した振動モードの精緻な制御を目的とする。

前者の DVFB 法は, コロケーションという制約があるものの, 単純なフィードバック系で構成され, 全振動モードに対してダンピングが付与でき, かつ系の不安定化を惹起することもない反面, 特定した振動モ

ードの制御が困難なものとなる。これに対して, HAC の範ちゅうに属するロバスト制御法は, 少数の振動モードの制御が可能ではあるが, その適用結果, 荒唐無稽ともいえる肥大化した制御器を必要とする。

分布定数系構造物の振動制御系を構築するに当たって, 簡素にして効果的な制御系が実現できればそれに越したことはない。また, 制御の基本はセンシングにあり, 制御に必要な情報を入手することで, 制御系の簡素化は促される。これと反対のスタンスをとるのがロバスト制御法で, 系のあいまい性をベースとして展開した制御ツールであるため, 複雑な制御系がその帰結となる。

著者らはこれまでに, 分布定数系構造物に無数存在する振動モードを, 共通した属性を有するクラスタに分割するクラスタフィルタリング法⁽⁵⁾ について明らかにした。弁別された有限個のクラスタは, 同族の特性を共有することから, 制御の操作性が容易となる可能性がある。また, フィルタリング/アクチュエーションの間に相反性が存在し, クラスタの次元でスピルオーバー問題は発生しないことが判明⁽⁵⁾ したので, 簡素にして精緻な制御効果を期待することができる。本論文は, 前報⁽⁵⁾ で提案したクラスタフィルタリング/アクチュエーションを構成要素とするクラスタ制御をさ

* 原稿受付 1997 年 6 月 23 日。

*¹ 正員, 工業技術院機械技術研究所 (☎ 305-8564 つくば市並木 1-2)。

らに発展させ、対象領域に存在するすべての振動モードの抑制法を提案するものである。本手法は、LAC法のもつ簡素な制御系と HAC 法のもつ精緻な制御機能を合せもつ、いわば MAC(Middle Authority Control)なる範ちゅうに属する手法といえる。

前報⁽⁶⁾においては、クラスタ制御の構成要素となるクラスタフィルタリング/アクチュエーションについて詳述されているので、本論文ではまず、これらを基調とするクラスタ制御法を数学的に記述することから始め、それ以降は単純支持平板構造物を対象とした実験を通じて、逐次クラスタ制御に関する有意性の検証を展開していく。次に、4 個の速度センサで構成されるクラスタフィルタリング法により、全振動モードを 4 種類のクラスタ⁽⁶⁾⁽⁷⁾(奇/奇モード、奇/偶モード、偶/奇モード、偶/偶モード)に弁別する。ついで、クラスタフィルタリングと相反性が成立するクラスタアクチュエーションを導入し、4 個のアクチュエータを用いてクラスタ制御を行う。また、制御ターゲットをクラスタから全振動モードに変え、各クラスタからの制御信号の極性を考慮してフィードバック系を構築することにより、全振動モードの制御を可能とするクラスタ制御法を提案する。当該手法は各クラスタに対する重みを独立して課することができるため、例えば振動放射音の支配因子である音響パワーモード^{(6)~(8)}を抑制する場合などに対してはとりわけ有利となる。さらに、分布定数系構造物の振動制御法として在来より広く用いられている DVFB 法とクラスタ制御法とを比較検討することにより、DVFB 法がクラスタ制御法の特長な場合に位置付けられることを示すとともに、4 アクチュエータ制御を 1 アクチュエータ制御に変えても、クラスタ制御が可能であることを明らかにする。

2. クラスタ制御

2.1 DVFB 制御 二次元非減衰分布定数系構造物の基礎式として、領域 D において次の偏微分方程式を考える。

$$L[w(\mathbf{r}, t)] + m(\mathbf{r})\ddot{w}(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}, t) \quad \cdots (1)$$

ただし、 $\mathbf{r}$ は構造物の任意点における座標(x, y)、 $w(\mathbf{r}, t)$ および $\ddot{w}(\mathbf{r}, t)$ は $\mathbf{r}$ における振動変位および加速度、 $m(\mathbf{r})$ は質量密度、 $f(\mathbf{r}, t)$ は分布制御力、 L は自己随伴微分演算子を表す。すると、 $w(\mathbf{r}, t)$ および $f(\mathbf{r}, t)$ はモード関数 $\varphi_k(\mathbf{r})$ およびモード $\eta_k(t)$ 、 $f_k(t)$ ($k=1, 2, 3, \dots$)を用いて、以下のように記述することができる。

$$w(\mathbf{r}, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}) \eta_k(t) \quad \cdots (2)$$

$$f(\mathbf{r}, t) = \sum_{k=1}^{\infty} m(\mathbf{r}) \varphi_k(\mathbf{r}) f_k(t) \quad \cdots (3)$$

さらにモード関数 $\varphi_k(\mathbf{r})$ は演算子 L および $m(\mathbf{r})$ に関し、次のように正規化されるものとする。

$$\int_D \varphi_r(\mathbf{r}) L[\varphi_s(\mathbf{r})] d\mathbf{r} = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad \cdots (4)$$

$$\int_D \varphi_r(\mathbf{r}) m(\mathbf{r}) \varphi_s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \delta_{rs} \quad \cdots (5)$$

ここで ω_r は r 次のモード周波数、 δ_{rs} はクロネッカーデルタを表す。すると $\eta_k(t)$ および $f_k(t)$ は次のように記述できる。

$$\eta_k(t) = \int_D \varphi_k(\mathbf{r}) m(\mathbf{r}) \dot{w}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad \cdots (6)$$

$$f_k(t) = \int_D \varphi_k(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad \cdots (7)$$

次に、ポイントセンサで $\mathbf{r}_m$ 点における速度をセンシングし、ポイントアクチュエータで $\mathbf{r}_a$ 点を加振するものとする。式(3)の制御力はフィードバックゲイン g_s を用いて次式のように記述できる。

$$f(\mathbf{r}, t) = -g_s \dot{w}(\mathbf{r}_m, t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) \quad \cdots (8)$$

式(8)に $\varphi_i(\mathbf{r})$ を乗じ、領域 D で積分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_D \varphi_i(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} &= -g_s \int_D \varphi_i(\mathbf{r}) \dot{w}(\mathbf{r}_m, t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) d\mathbf{r} \\ &= -g_s \varphi_i(\mathbf{r}_a) \dot{w}(\mathbf{r}_m, t) \\ &= -g_s \varphi_i(\mathbf{r}_a) \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}_m) \dot{\eta}_k(t) \quad \cdots (9) \end{aligned}$$

式(9)を基に振動方程式をモード座標系で記述すると $\ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t)$

$$= -g_s \varphi_i(\mathbf{r}_a) \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}_m) \dot{\eta}_k(t) \quad \cdots (10)$$

となる。ここで、コロケーションが成立すると

$$\mathbf{r}_a = \mathbf{r}_m \quad \cdots (11)$$

したがって、式(10)は次式となる。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) &= -g_s \varphi_i(\mathbf{r}_a) \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}_a) \dot{\eta}_k(t) \quad \cdots (12) \end{aligned}$$

式(12)を図式化した図1(a)を見ると明らかなように、ポイントセンサ/ポイントアクチュエータを使用することにより、観測スピルオーバー/制御スピルオーバーが発生しているものの、コロケーションが成立する場合は各モード入出力端にあるトランスミッタンスが同値[例えば s 次モードに対しては $\varphi_s(\mathbf{r}_a) = \varphi_s(\mathbf{r}_m)$] となるため、各モードには必ずネガティブフィードバックが作用する結果、系が不安定になることはない。

2.2 クラスタ制御 MAC(Middle Authority Control) クラスタ制御⁽⁶⁾とは、無数に存在する固有関数群をクラスタフィルタリングにより、いくつかの

Fig. 1 Conceptual diagram of cluster control

共通した属性を有する群に分割し、そのクラスタを独立に制御する手法をいう。前報⁽⁵⁾においては、単純支持矩形平板($L_x \times L_y \times h$)を対象としてクラスタフィルタリングおよびクラスタアクチュエーションについて明らかにしているので、本論文ではその結果を踏襲し、奇/奇モーダルクラスタ制御の例証を通じて、クラスタ制御系の解明を行う。

まず、クラスタフィルタリングは以下の位置に設置される4個の速度センサを必要とする。

$$\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1) \dots\dots\dots (13)$$

$$\mathbf{r}_2 = (L_x - x_1, y_1) \dots\dots\dots (14)$$

$$\mathbf{r}_3 = (L_x - x_1, L_y - y_1) \dots\dots\dots (15)$$

$$\mathbf{r}_4 = (x_1, L_y - y_1) \dots\dots\dots (16)$$

ただし

$$x_1 \ll L_x, y_1 \ll L_y \dots\dots\dots (17)$$

するとこれらのセンサ出力は次のように記述できる。

$$\dot{w}(\mathbf{r}_i, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}_i) \dot{\eta}_k(t), i=1 \sim 4 \dots\dots\dots (18)$$

次に、奇/奇モーダルクラスタのフィルタリングに関しては、式(18)の出力をすべて単純加算すればよい⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \dot{w}(\mathbf{r}_i, t) &= \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(\mathbf{r}_i) \dot{\eta}_k(t) \\ &= 4 \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k^{o/o}(\mathbf{r}_1) \dot{\eta}_k^{o/o}(t) \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

ここで $\varphi_k^{o/o}$ および $\eta_k^{o/o}$ は奇/奇モード群の固有関数およびモード係数を表す。

クラスタアクチュエーションに関しても、クラスタフィルタリングとの双対性を利用することにより、4個のアクチュエータを $\mathbf{r}_1 \sim \mathbf{r}_4$ に設置することで達成される。式(19)で得たクラスタフィルタリング信号をフィードバック信号として使用し、フィードバックゲ

インを $g_{o/o} = g_s$ とすると、式(3)の制御力は次式のよう

$$f(\mathbf{r}, t) = -4g_{o/o} \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k^{o/o}(\mathbf{r}_1) \dot{\eta}_k^{o/o}(t) \sum_{i=1}^4 F_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \dots\dots\dots (20)$$

ここで F_i は制御力振幅を表す。次に、奇/奇モーダルクラスタのアクチュエーションを考える。そのためには、4アクチュエータの極性を次式のように設定⁽⁵⁾する必要がある。

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = 1 \dots\dots\dots (21)$$

式(21)を式(20)に代入し、さらにこれに $\varphi_i(\mathbf{r})$ を乗じ、領域 D で積分すると次式を得る。

(i) $\varphi_i(\mathbf{r})$ が奇/奇モード関数の場合

$$\begin{aligned} \int_D \varphi_i(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \\ = -16g_{o/o} \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k^{o/o}(\mathbf{r}_1) \dot{\eta}_k^{o/o}(t) \varphi_i(\mathbf{r}_1) \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

(ii) $\varphi_i(\mathbf{r})$ が奇/奇モード関数でない場合

$$\int_D \varphi_i(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = 0 \dots\dots\dots (23)$$

したがって、式(22)、(23)を用いて、式(1)の振動方程式をモード座標系で記述すると次式を得る。

(i) $\varphi_i(\mathbf{r})$ が奇/奇モード関数の場合

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) \\ = -16g_{o/o} \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k^{o/o}(\mathbf{r}_1) \dot{\eta}_k^{o/o}(t) \varphi_i(\mathbf{r}_1) \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

(ii) $\varphi_i(\mathbf{r})$ が奇/奇モード関数でない場合

$$\ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

式(24)、(25)より明らかなように、奇/奇モーダルクラスタからの出力は奇/奇モーダルクラスタに速度フィードバックされ、他のクラスタに観測/制御スピルオーバーを惹起することはないことがわかる。同様に、

$$F_1 = F_2 = -F_3 = -F_4 = 1 \dots\dots\dots (26)$$

$$F_1 = -F_2 = -F_3 = F_4 = 1 \dots\dots\dots (27)$$

$$F_1 = -F_2 = F_3 = -F_4 = 1 \dots\dots\dots (28)$$

とすることで、おのおの、奇/偶、偶/奇、偶/偶モード
 クラスタの制御系が導出され、かつ、クラスタ間は
 非干渉となる。また、このクラスタ制御系の概念図を
 示したのが図1(B)である。

このように、クラスタ制御法は、広範囲な周波数領
 域を対象として、ターゲットとするクラスタを非干渉
 制御することが可能であり、それは4個のセンサから
 なる簡素なフィードバック系で構成できる。この特性
 を鑑み、LAC/HACと当該法との特質を照合するこ
 とにより、クラスタ制御はMAC(Middle Authority
 Control)の範ちゅうに属するといえる。

3. クラスタ制御の実験

本実験で用いた鋼板製供試パネル($L_x=88$ cm, L_y
 $=180$ cm, $h=9$ mm)が、厚さ10 cmの鉄筋コンクリ
 ート製エンクロージャの上面でパネル両面をナイフエ
 ッジで挟むように固定され、その単純支持境界条件を

成立させている。また、パネルに作用する外乱は $r=($
 0.24 m, 0.25 m)の位置に設置された動電形加振器に
 よって打撃力として与え、またクラスタフィルタリ
 ングに使用される4個の速度センサは、おのおの $r_1=($
 20 cm, 21 cm), $r_2=(68$ cm, 21 cm), $r_3=(68$ cm,
 159 cm), $r_4=(20$ cm, 159 cm)に設置される。さらに

Table 1 Modal frequency and modal number of a simply supported plate

Mode number	Mode	Modal frequency Hz	Mode number	Mode	Modal frequency Hz
1	(1,1)	35.292	12	(3,2)	283.588
2	(1,2)	55.716	13	(2,5)	284.136
3	(1,3)	89.756	14	(3,3)	317.628
4	(2,1)	120.744	15	(2,6)	359.024
5	(1,4)	137.412	16	(1,7)	362.077
6	(2,2)	141.168	17	(3,4)	365.284
7	(2,3)	175.208	18	(3,5)	426.556
8	(1,5)	198.684	19	(2,7)	447.529
9	(2,4)	222.864	20	(4,1)	462.551
10	(3,1)	263.164	21	(1,8)	464.197
11	(1,6)	273.573	22	(4,2)	482.975

Fig. 2 Dynamic mobility obtained by cluster control for the odd/odd modal cluster

Fig. 3 Dynamic mobility obtained by cluster control for the odd/even modal cluster

実験で使用された打撃力のスペクトル特性を考慮し、対象周波数範囲としては 500 Hz までとし、表 1 には当該周波数域内に存在する 22 個のモード周波数の解析解とそのモード番号が昇幕の順に示されている。

3・1 各モーダルクラスタの抑制 奇/奇モード群のクラスタ制御結果が図 2(B)に示されている。表 1 より明らかなように、当該周波数領域に存在する奇/奇モードは(1, 1)モードから(3, 5)モードまでの都合 7 個であるが、外乱打撃力を与える作用点が、今回の実験では、(1, 7)モードのノーダルライン上にほぼ合致してしまったため、(1, 7)モードはごくわずかしき励起されておらず、当該モードに関する抑制効果を検討することはできない。このモードを除いて、6 個のフィルタリングされた奇/奇モードはすべて図 2 のように抑制されており、前報⁽⁵⁾で示したクラスタフィルタリング結果と比較すると、いずれのモードも 20～30 dB の高い抑制効果を得ていることがわかる。なお、フィードバックゲインの設定に当たっては、駆動点インパルス応答波形をモニタリングしつつ、最大の減衰

が得られるようフィードバックゲインを探索した。クラスタ制御の特徴の一つに、系の不安定化を招くことなくハイゲインのフィードバック制御系を構築することができる点にあり、実験によってそのことが立証できた。ただし、理論的にはハイゲインフィードバックが可能ではあっても、実際問題としては、増幅器類の飽和やドリフトなどが発生するため、フィードバックゲインの設定には自ずと限界がある。また、実験においては、ローパス/ハイパスフィルタなどのフィルタ類は、制御信号の位相に影響を与えるおそれがあるので一切使用していない。さらに、図 2(A)に示されている駆動点モビリティ(速度/外乱力)を見ても明かなように、いま対象とする周波数帯域に 22 個存在する振動モードの内、奇/奇モード群のみが図に示すように抑制され、非干渉制御の結果、他のクラスタへは影響を及ぼすことがない。

次に、速度センサおよびアクチュエータの極性を、式(26)～(28)に従って変化させることにより、奇/偶モーダルクラスタ、偶/奇モーダルクラスタ、偶/偶モ

Fig. 4 Dynamic mobility obtained by cluster control for the even/odd modal cluster

Fig. 5 Dynamic mobility obtained by cluster control for the even/even modal cluster

ードルクラスタの制御が可能となる。まず、図3は奇/偶モードクラスタに関する制御効果を示している。非制御状態を示すクラスタフィルタリング結果⁽⁵⁾と比較すると明らかなように、30~40 dBの高い抑制効果が得られている。また、表1より、奇/偶モードである(1, 4)モードと偶/偶モードにあたる(2, 2)モードとはわずか3.7 Hzしか離れていない、所謂縮退に近い状態であることがわかるが、図3(A)の駆動点モビ

Fig. 6 Dynamic mobility obtained by cluster control for all modal cluster

リティが示すように、相方の(2, 2)モードには何ら影響を与えることなく、今対象とする(1, 4)モードのみが抑制されている。

図4は偶/奇モードクラスタに関する制御効果を示しており、当該周波数域に存在する5個のモードがすべて抑制されている。この場合、奇/奇モード群のケースで記した理由により、(1, 7)モードと同族の(2, 7)モードの励起は乏しい。また、偶/奇モードである(2, 5)モードと奇/偶モードの(3, 2)モードとは、モード周波数がわずか0.5 Hzしか離れていないものの、図4(B)から明らかなように、(2, 5)モードのみが完全に分離/抑制されており、さらに図4(A)に示す駆動点モビリティから明らかなように、(3, 2)モードには影響を与えることがない。

偶/偶モードクラスタに関する制御効果を図5に示す。この場合、4個の偶/偶モードがすべて抑制され、奇/奇モード群のケースで記したように、(1, 4)モードと(2, 2)モードとが近接しているものの、図5に示すように(2, 2)モードのみがフィルタリング/抑制されており、図5(A)の駆動点モビリティに示すように、(1, 4)モードに影響を及ぼすことがない。

Fig. 7 Time history of impulse responses of all clusters using cluster control

3・2 全クラスタの抑制 3・1節では、クラスタ制御を講ずることで、対象クラスタのみを他のクラスタとは独立して制御できることを実証した。本節では、それをさらに発展させて、対象周波数領域に存在する全振動モードの抑制を図る。そのためには、全振動モードが四つのクラスタで構成されることから、四つのクラスタを同時に抑制すればよい。ここで次の懸念が生ずる。すなわち、一つのクラスタを制御する際に4個の速度センサ/アクチュエータを必要としたので、四つのクラスタを制御するには、都合16個のセンサ/アクチュエータが必要になるのではないかという点である。しかしながら、この問題も、以下のようにクラスタ制御系を組立てることにより、依然として4個の速度センサ/アクチュエータで4個のクラスタを同時に制御することができる。次にその手順について述べよう。

ステップ1 4個の速度センサ出力をクラスタの特性に応じて加減算することにより、4種類のクラスタ信号を得る。

ステップ2 各クラスタ信号にフィードバックゲインを乗じ、奇/奇モード群、奇/偶モード群、偶/奇モード群、偶/偶モード群に対しておのおのの制御信号 $u_{o/o}$, $u_{o/e}$, $u_{e/o}$, $u_{e/e}$ を得る。

ステップ3 制御信号の極性を各クラスタの特性に応じて、四つのアクチュエータにフィードバックする。すなわち、センサ/アクチュエータ設定点 r_i を基準として、各アクチュエータには、例えば奇/奇モード群に対しては $\{+u_{o/o}, +u_{o/o}, +u_{o/o}, +u_{o/o}\}$ を、奇/偶モード群に対しては $\{+u_{o/e}, +u_{o/e}, -u_{o/e}, -u_{o/e}\}$ というように、クラスタの特性に合わせて、極性を変えてフィードバックすればよい。名制御信号は、お互いに独立した固有関数で構成されるので、各クラスタ信号を重畳してもそれらはお互いに相殺されることがない。

図6は各クラスタに同一の重み $\{g_{o/o}=g_{o/e}=g_{e/o}=g_{e/e}\}$ を与えて、全振動モードを抑制した結果を示している。図2(A)~5(A)と図6(A)に示す駆動点モビリティを比較すると明らかなように、前者は対象クラスタのみを制御ターゲットとしたので、全域的な抑制効果が顕著ではなかったのに対し、後者の場合は全クラスタ、すなわち全振動モードが抑制されているのがわかる。図6(B)~(E)には奇/奇、奇/偶、偶/奇、偶/偶モーダルクラスタの抑制効果が示されており、いずれの場合も最大ゲインが7~8 dBにまで抑制されている。

この場合のインパルス応答結果を示すと図7とな

る。図7(B)は非制御状態の外乱作用点におけるインパルス速度波形を、また図7(C)には全クラスタを抑制した際のインパルス速度波形を示している。非制御状態では打撃から0.2 s経過した状態でも、依然として激しい振動が残留しているが、クラスタ制御を講ずることにより、それもわずか0.04 sで完全に消滅している。

次に、各クラスタに対する重みを変えて制御を講じ

Fig. 8 Dynamic mobility obtained by cluster control with the same cluster feedback gains

Fig. 9 Dynamic mobility obtained by direct velocity feedback control

た結果の一例を図8に示す。この場合の重みは $\{g_{o/o}=1, g_{o/e}=2/3, g_{e/o}=2/3, g_{e/e}=1/3\}$ とした。図8(A)には外乱作用点におけるモビリティが示されている。この場合、図6(A)と本図とを比較しても双方に大きな相違は認められていないが、図6(B)～(E)と図8(B)～(E)に示されている各クラスタ同士で比較するとその差が明りょうとなる。すなわち、図6に示す均等制御の場合は、各クラスタにおける最大ゲイ

Fig. 10 Dynamic mobility obtained by cluster control with one actuator aiming at the suppression of the odd/odd modal cluster

ンがいずれも7～8 dBであったのに対し、図8の重み付け制御の場合は、奇/奇、奇/偶、偶/奇、偶/偶モード群に対して、最大ゲインがおのおの3 dB、6 dB、7 dB、12 dBと変化しており、各クラスタに対する案分が顕著に反映されている。

次に、従来より分布定数系構造物の振動制御法として広く用いられているDVFB法⁽²⁾について検討する。公正を期すために、クラスタ制御を講ずる際に使用した条件(4個の速度センサ/アクチュエータ)をそのまま適用する。図9は、その際に得られたDVFB法による振動抑制結果である。この場合も、速度フィードバックゲインは現場調整に任せ、インパルス応答波形をモニタリングしながら最良のデータを探索した。さらに、その際に使用した4個の速度センサよりクラスタフィルタリングができるので、DVFBを講じた場合の各クラスタの寄与度も合せて図9(B)～(E)に示している。図6のクラスタ制御効果と図9のDVFB制御効果とを比較すると明らかなように、これ

らはほぼ等価であることがわかり、これは DVFB 法が本論文で提案するクラスタ制御の特殊な場合 $\{g_{o/o} = g_{o/e} = g_{e/o} = g_{e/e}\}$ に相当することを意味している。

3・3 1 アクチュエータによるクラスタ制御 これまではクラスタフィルタリング/アクチュエーションの相反性を利用するために、4 個のセンサ/アクチュエータを使用した。クラスタフィルタリングを基調とする 1 アクチュエータだけによるクラスタ制御も可能となる。この場合、対象とするクラスタ以外にも制御スピルオーバーが発生するが、クラスタの次元での観測スピルオーバーがないので、系が不安定化することはない。また、アクチュエータの設置箇所を実験では r_1 としたが、クラスタの保有する属性により、それは $r_2 \sim r_4$ のいずれでも構わないので、コロケーション問題が緩和される。図 10 は、1 アクチュエータを用いた場合の、奇/奇モダルクラスタ抑制結果を示している。4 アクチュエータを使用した場合(図 2)と比較して、抑制効果が全体的に 2 dB 程度劣化しており、それは制御パワー不足と制御スピルオーバーによるものと考えられる。なお実験を進めるに当たり、東京工科大卒論生 楠岡忠幸君には多大な協力をいただいた。ここに深謝する次第である。

4. 結 言

分布定数系構造物の振動制御を対象として、LAC と HAC の中間に位置づけられるクラスタ制御法 (MAC: Middle Authority Control) を提案し、その有意性を立証した。当該手法は LAC 法の有する簡素

な系構成と、HAC 法の有する精緻な制御機能を合せもっている。まず、クラスタ制御法の系構成を明らかにするとともに、当該系がクラスタの次元で制御/観測スピルオーバーを発生することなく、独立してクラスタを制御できることを示した。ついで、単純支持平板を対象として、4 速度センサ/アクチュエータでクラスタ制御系を構成し、4 クラスタの制御効果を実証した。さらに、クラスタ制御の応用として、全振動モードを制御ターゲットとするクラスタ制御系の構成手順を明らかにするとともに、当該制御機能を秀逸性を立証した。さらに、クラスタ制御法が在来の DVFB 法を包含する手法であることを示すとともに、1 アクチュエータによるクラスタ制御も可能であることを示した。この場合、アクチュエータの設定位置は平板四隅のいずれでもよいので、コロケーション問題が緩和される。

文 献

- (1) Aubrun, J. N., *J. Guidance and Control*, **3**(1980), 444-451.
- (2) Balas, M. J., *J. Optimization Theory and Applications*, **25**-3(1978), 415-436.
- (3) 例えば, Kalman, R. E., *ASME Ser. D. Basic Eng.*, **86**(1964), 1-10.
- (4) 例えば, Doyle, J. C., *IEEE Proc.*, Vol. 129, Pt. D(1982), 242-250.
- (5) 田中信雄・菊島義弘, 機論, **64**-619, C(1998), 780-787.
- (6) 田中信雄・ほか 3 名, 機論, **59**-567, C(1993), 3444-3451.
- (7) 田中信雄・ほか 3 名, 機論, **60**-573, C(1994), 1646-1653.
- (8) Tanaka, N., ほか 2 名, *ASME, J. Vib Acoust.*, **118**(1996), 630-640.