

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82670 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21760179
 研究課題名（和文） スマートアクチュエータによる一般構造物のアクティブ振動制御
 研究課題名（英文） Active vibration control of a structure using smart actuator
 研究代表者
 福田 良司（FUKUDA RYOJI）
 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発第一部機械技術グループ・副主任研究員
 研究者番号：60463030

研究成果の概要（和文）：本研究は一般的な構造物の振動を対象とし、その振動制御系構築に際して新たなアクチュエータを提案する。従来のアクチュエータでは、構造物への設置位置により、制御スピルオーバーが生じる。これに対し本研究で提案するアクチュエータは、構造物のどの位置に設置しても制御スピルオーバーを引き起こすことがない。はじめに、アクチュエータの形状を提案し、実験により提案したアクチュエータの特性を確認し、制御スピルオーバーが回避できることを実証した。

研究成果の概要（英文）：This study considers the active vibration control of a distributed-parameter planar structure. Difficulty in actively controlling a distributed-parameter structure attributes to an infinite number of vibration modes it has, causing spillover problems that lead to the instability of a control system. To verify the validity of the proposed method, this study conducts the experiment in an effort to suppress vibration of a distributed-parameter planar structure using smart actuator.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：スピルオーバー、圧電セラミックス、振動モード、振動制御、アクチュエータ、ノードライン、形状関数

1. 研究開始当初の背景

構造物に生じた振動を、何らかの制御手法を用いて能動的に制御しようとする、センサ、コントローラ、アクチュエータが必要である。さらに制御系として留意しなければな

らないのがスピルオーバー問題である。いかに高等な制御手法を用いたとしても、センサやアクチュエータの次元でスピルオーバーが生じてしまうと、コントローラが十分な性能を発揮できず、良好な制御効果は得られない。

従来の振動制御で用いられているセンサ、アクチュエータは、加速度ピックアップや動電型加振器に代表されるように、集中定数系に分類されるものが多い。近年では、圧電材料を用いたセンサやアクチュエータが用いられるようになったが、一般的には矩形のものも多く、スビルオーバー問題を追究したようなものはない。

2. 研究の目的

先に述べた背景を踏まえ、本研究では振動制御におけるスビルオーバー問題を解決するための、スマートアクチュエータを提案し、その性能と振動制御効果について実験を行い実証する。なお、センサについては、下名が既に研究を行っているので、詳細については関連する日本機械学会の論文を参照されたい。

3. 研究の方法

これまでの研究成果から、圧電材料のある条件を満たす形状に加工してセンサとして用いると、構造物の全ての振動モードをセンシングすることが可能であることを提案し、実験により実証した。本研究では、アクチュエータの材料として、センサと同様に圧電材料を用い、センサとアクチュエータ間に相反性が成り立つとの仮定のもとに、アクチュエータの形状を提案する。ここで提案するアクチュエータの形状が、スビルオーバー問題を回避できることを確認するため、圧電セラミクスを提案する形状に加工し、実際に構造物を加振して、アクチュエータとしての性能を検証する。最後に、提案するアクチュエータを含む振動制御系を構築し、ひとつの制御系としての振動抑制効果を検証する。

4. 研究成果

(1) スマートアクチュエータの形状決定にあたり、既に発表しているスマートセンサとの間に相反性が成り立つと仮定して、設計を行った。構造物の全ての振動モードをセンシングするためには、2次元分布定数系センサの一边を2次以上の関数に従ってシェーピングすれば良いことが分かっている。ここで、センサとアクチュエータの間に相反性が成り立つとすれば、2次元分布定数系アクチュエータの一边を、センサと同様に2次以上の高次関数に従ってシェーピングすれば、アクチュエータの設置位置が振動モードのノードラインと合致しても、当該モードを励起することが可能となる。

はじめに、形状関数 $\psi(x)$ でシェーピングされた2次元分布定数系アクチュエータが、平板に貼付された際の平板の運動方程式は次式となる。

$$D\nabla^2\nabla^2 w(\mathbf{r}, t) + \rho h \ddot{w}(\mathbf{r}, t) = -\kappa e(t) \left(d_{31} \frac{\partial^2 \psi(\mathbf{r})}{\partial^2 x} + d_{32} \frac{\partial^2 \psi(\mathbf{r})}{\partial^2 y} \right)$$

ここで、 D は平板の曲げ剛性、 ∇ は微分演算子、 ρ は平板の密度、 κ は圧電材料の厚さに関する定数、 e は入力電圧、 d_{31} および d_{32} は圧電材料の圧電定数をそれぞれ表す。次に、2次元分布定数系アクチュエータの形状関数を、先の研究成果をもとに、次式で表す2次関数として定義する。

$$\psi_1(x) = \frac{y_a - y_b}{(x_b - x_a)^2} (x - x_a)^2 + y_b$$

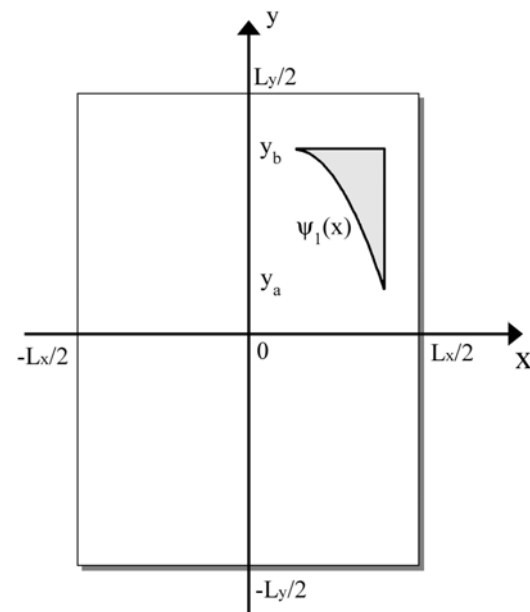


図 1. スマートアクチュエータの形状関数と貼付位置

(2) つぎに、提案したアクチュエータの形状関数が、全ての振動モードを励起可能なことを確認するため、実験を行う。実験は、矩形の単純支持平板を用い、(1, 3)モードのノードライン上に、今回提案するスマートアクチュエータを設置し、当該モードを含む、全ての振動モードが励起できることを確認する。今回の研究用に製作した単純支持矩形平板の全体図を図2に、ナイフエッジによって平板が支持されている様子を図3にそれぞれ示す。

はじめに、平板を加振した際の周波数特性を図4に示す。500Hzまでの領域には13個のピーク、すなわち振動モードが存在することが確認できた。そこで、各周波数におけるモード形状を確認するため、スキャニングレーザ振動計を用いて、振動形状の計測を行った。

そのうち、(1, 3)モードと(2, 3)モードの形状をそれぞれ図 6, 7 に示す。この結果から、提案するアクチュエータの貼付位置を決定した。また、スキャニングレーザ振動系により計測した振動形状から、モードの固有周波数を表 1 にまとめる。

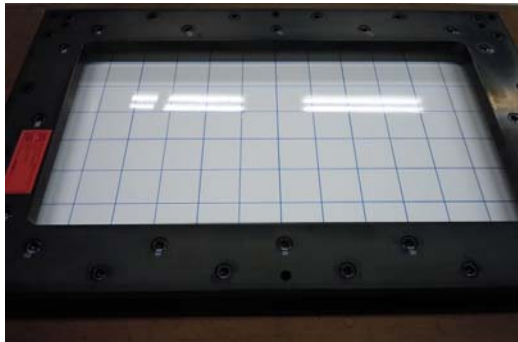


図 2. 単純支持平板

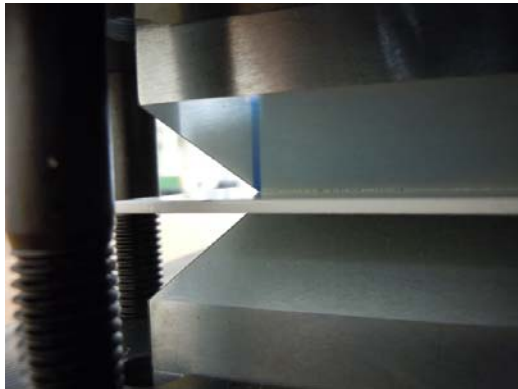


図 3. ナイフエッジと矩形平板

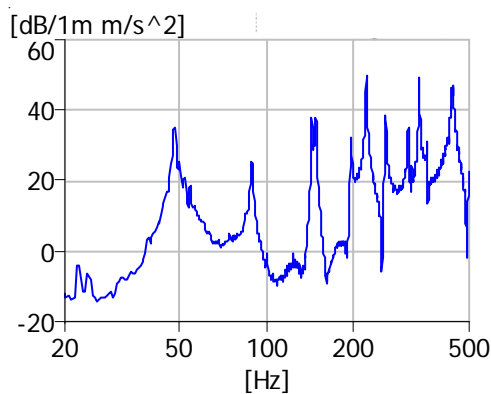


図 4. 平板の周波数特性

表 1. 平板のモード周波数

周波数 Hz	モード	周波数 Hz	モード
48.1	(1, 1)	308.8	(3, 1)
89.4	(1, 2)	317.5	(1, 5)
143.8	(1, 3)	338.1	(2, 4)
148.1	(2, 1)	358.8	(3, 2)
195.6	(2, 2)	426.8	(3, 3)
221.8	(1, 4)	441.8	(1, 6)
258.8	(2, 3)		

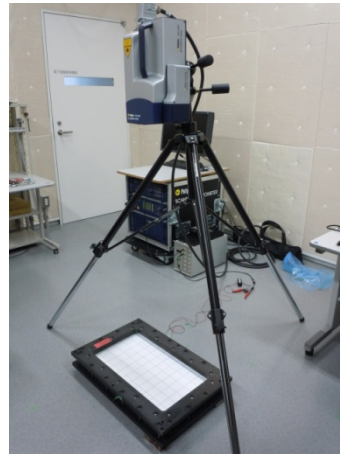


図 5. スキャニングレーザ振動計による振動形状計測

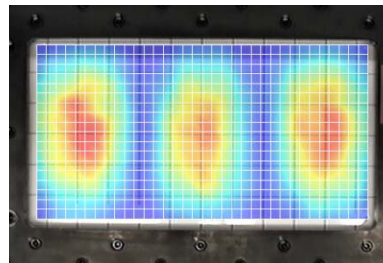


図 6. (1, 3)モードの振動形状

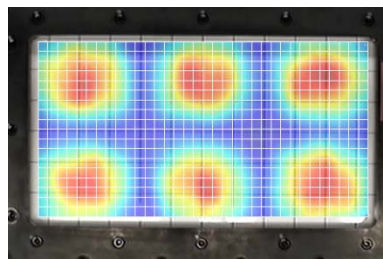


図 7. (2, 3)モードの振動形状

(3)つぎにスマートアクチュエータの具現化について述べる。アクチュエータの材料には富士セラミクス(株)製の 0.05m×0.1m、厚さが 0.001m、材料特性が C-82 で表される矩形の圧電セラミクスをもとに、先に提案した形

状関数に従ったシェーピングを施した。写真を図 8 に示す。なお、アクチュエータを具現化するために最低限の加工が必要になるが、この加工工程において、圧電セラミックスの破損を防ぐため、端部に僅かな幅を持たせてある。この圧電セラミックスをスマートアクチュエータとして、矩形平板上にエポキシ系接着剤を用いて貼付した。

このアクチュエータによる平板の加振実験を行ったので、結果を図 9 に示す。まず注目すべきは(1, 3)モードが存在する 148Hz 付近の周波数特性であるが、卓越したピークの存在が確認できる。このことから、アクチュエータ上をノードラインが通過しても、対象の振動モードを励起することが可能であることを明らかにした。同様に(2, 3)モードのノードラインもアクチュエータ上を通過しているが、258Hz 付近にピークが確認できる。さらに、500Hz までの帯域に存在する残りの振動モードも、全て励起されていることが確認できる。このことから、本研究で提案するスマートアクチュエータにより、ノードラインの位置に関係なく、振動モードを励起させることが可能であることを実証した。

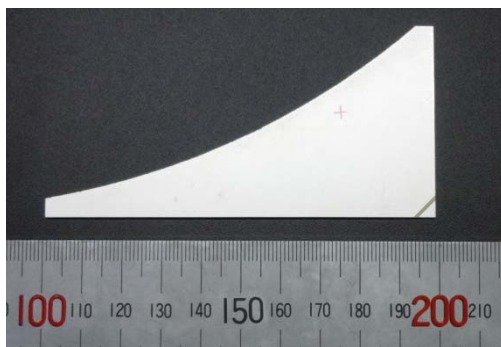


図 8. 圧電セラミックスを用いて試作したスマートアクチュエータ

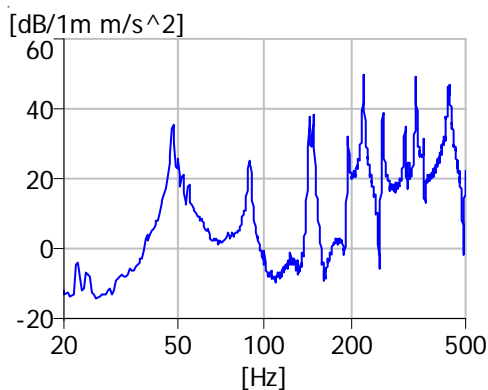


図 9. 提案するスマートアクチュエータによる平板の加振実験結果

(4) 最後に、振動制御系のアクチュエータとして採用した際の効果を検証するため、クラスタ制御系を構築した。クラスタ制御の特徴は、構造物に無数に存在する振動モードを有限個の群に分類することである。このグルーピングによって、簡素で高効率な制御を実現できることは既報の通りである。本実験では、アクチュエータの次元における制御スピルオーバを検証するとともに、クラスタ制御系の特徴である制御対象の振動モード群のみに制御効果が与えられるという点が踏襲されていることを示す。まず、センサについては、一般的な加速度ピックアップを用い、得られた加速度信号をエラー信号とした。制御系は、フィードフォワード型とし、filtered-x LMS アルゴリズムにより、エラー信号を最小化するための制御信号を生成する。この信号に従って、平板に制御力を講じるわけだが、ここで、今回提案するスマートアクチュエータを用いる。

次に、実験結果について述べる。はじめに、平板へ与える外乱は、(2)で述べたアクチュエータの性能検証実験と同様、500Hz までのホワイトノイズを用いる。なお外乱用アクチュエータは、平板の裏面に矩形の圧電セラミックスを貼付した。この外乱により励起された平板の振動を抑制するために振動制御を講じたので、結果を図 10 に示す。制御対象である(1, 1)モードから(1, 3)モードを含む 5 つのモードによるピークが十分に抑制されている。加えて、制御対象外のモードについては、制御前後において、ピークの変化は見られない。このことから、提案したスマートアクチュエータが、振動制御におけるアクチュエータとして十分な性能を有していることが実証された。加えて、クラスタ制御との組み合わせにより、制御スピルオーバ問題も回避できることを明らかにした。

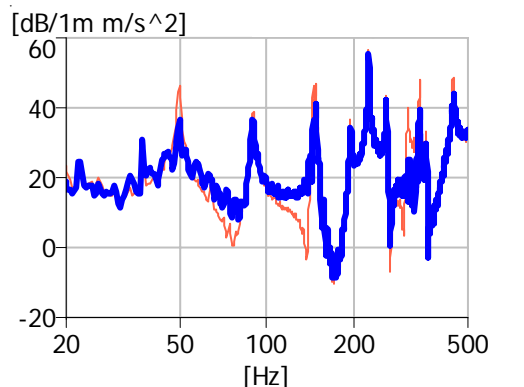


図 10. スマートアクチュエータを用いたクラスタ制御による平板の振動抑制効果
 — : 制御なし
 — : 制御あり

(5)まとめ

本研究での成果をまとめると以下の通り。

- ① 振動モードのノードラインの影響を受けずに、全ての振動モードを励起することが可能な分布定数系アクチュエータの形状を提案した。
- ② 単純支持の境界条件を実現し得る実験装置を製作し、鋼製矩形平板を使用した実験を行った。はじめに、平板の振動モード形状を確認するため、スキャニングレーザ振動計を用いて、振動形状を計測した。
- ③ 本研究で提案するアクチュエータを、圧電セラミクスを用いて具現化し、単純支持平板を用いて実証実験を行った。その結果、アクチュエータ上を振動モードのノードラインが通過しても、当該モードを励振することが可能なことを明らかにした。
- ④ 最後に、提案するアクチュエータを用いた振動制御(クラスタ制御)系を構築して、提案するアクチュエータによる振動制御効果を検証した。実験の結果、制御対象の振動モード群(クラスタ)について、10dB 前後の制御効果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 福田良司、田中信雄、振動制御と音響制御の併用による窓ガラス透過音低減、Dynamics and Design Conference 2011、2011年9月8日、高知工科大学
- ② 福田良司、田中信雄、貝塚勉、中野公彦、閉空間の音響モードによる影響を考慮した窓ガラスのアクティブ遮音、Dynamics and Design Conference 2010、2010年9月14日、同志社大学
- ③ 福田良司、貝塚勉、田中信雄、中野公彦、ガラス窓の能動遮音制御：クラスタ制御の適用、Dynamics and Design Conference 2009、2009年8月7日、北海道大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

福田 良司 (FUKUDA RYOJI)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発第一部機械技術グループ・

副主任研究員

研究者番号：60463030