

# 3. 振動を抑えるためのアクティブコントロール技術

日本大学 背戸一登

## ★ 振動制御の小史

1960年代から1970年代にかけて、工作機械のびびり振動を防止する研究が盛んに行われていた。インパクトダンパー、可調整型動吸振器、自己同調性を持たせた動吸振器などがびびり振動の防止を目標に研究されていたが、その中で生まれたのがサーボダンパー<sup>1)</sup>と呼ばれる今日のアクティブ動吸振器である。しかし、工作機械のびびり振動は機械の剛性を上げたり、切削条件を変えても防止できるところから、振動を制御するために開発されたアクティブコントロール技術も日を見るには至らなかった。

ところが、1980年代になって、その技術が建築の分野で注目され始めた。ビルが高層化すると風による揺れが問題になる。そこで、ビルの揺れ、すなわち振動を止めるために米国で最初にパッシブ形の制振装置がビルの頂部に取り付けられた。これは動吸振器と同じ原理で設計される物で、ビルの固有振動数と制振装置のそれを同調させて振動を止めるので同調形マスダンパー (Tuned

Mass Damper) と呼ばれている。しかし、これは同調がずれると期待した性能が得られない欠点を持っている。大きなマスを使えばその問題は低減できるのであるが、ビルの頂部に巨大なマスを置くわけにはいかないので、その後米国ではこの技術が廃れ始めていた。

この問題はアクティブコントロール技術によって解消される。このことについては後で触れるが、サーボダンパーがその先鞭を付けていたのである。我が国では建築の分野でも1970年代にその研究が始まっていた。1980年代に入ってRiccati方程式が容易に解けるアルゴリズムが生まれ現代制御理論が使いやすくなってきた。パソコン用コンピュータの性能も飛躍的に向上し、DSPなどの高速演算プロセッサも普及してきた。要するに、アクティブ制御が実用できる環境が整ってきた。そして、我が国では一気に建築の分野でアクティブコントロール技術が実用段階に達したのである<sup>2)</sup>。現在では、我が国にアクティブ制御ビルがすでに20数棟建設されている。土木工学の分野では長大橋の建設時にほとんどアクティブ制御技術が用いられている。自動車や鉄道車両も乗り心地を良くするためにアクティブ制御技術が盛んに用いられている。

そこで、本稿ではアクティブ制御の現状とその方法について説明し、その応用分野と効果について解説する。

## ★ アクティブ振動制御法と現状

機械工学の分野では古くから動吸振器と呼ばれる優れた制振器が知られていた。これは前にも述べたように、最適調整されれば優れた制振性能を発揮する。制振性能は質量比（動吸振器質量／制振対象の質量（図-1参照））によって構造的に定まる。質量比を大きくすればそれだけ大きな制振効果が期待できるのであるが、一般には構造の制約から大きくとれないで厳しい最適調整が要求されることになる。動吸振器にアクティブ機能を付けることによってその問題は解消される。つまり、動吸振器質量をアクティブに動かすことによって、質量比に依存しなくとも大きな制振力が得られるのである。アクティ

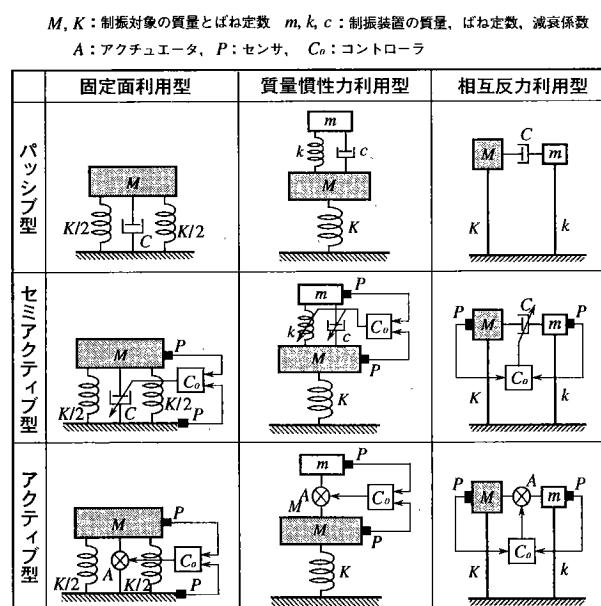


図-1 制振法の分類と制振装置の基本構成

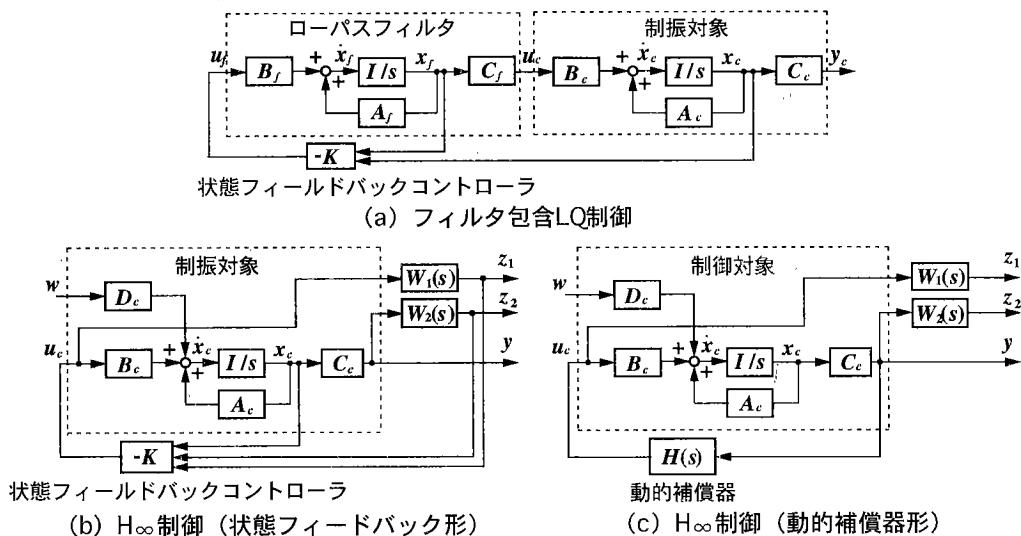


図-2 いろいろなロバスト制御法

ブ制御技術が実用化され始めた背景には、制御技術に関するソフトウェアとハードウェアの急速な進歩と普及があげられる。当初難解で直ちに実用にならないと考えられた現代制御理論が1980年代になってパソコンでRiccati方程式が容易に解けるようになり、身近なものになってきた。次いで、1980年代に起こったさらに難解なロバスト制御理論が、1990年当初にはMATLABのツールボックスとしてソフトウェアパッケージ化され、制御理論の専門家でなくとも使えるものとなった。このように、振動制御の分野は最新の制御理論の格好の試用の場となっている。デジタルシグナルプロセッサ(DSP)の発展はロバスト制御理論の実装化を可能にした。

図-1は、1自由度系に凝縮した制振対象に対して、制振法を制振構造と構成要素別にマトリクス上に分類した図表である<sup>3)</sup>。制振のための反力の与え方によって、固定面を利用する方法、補助質量の慣性力を利用する方法、構造物相互の反力を利用する方法に制振構造が大別される。また、構成要素別では、エネルギー不要なパッシブ型、パラメータ可変なセミアクティブ型、外部からエネルギーの注入を受けて作動するアクティブ型に分類される。補助質量を利用する方法は取り付けの制約を受けないので最もよく使われる方法であり、動吸振器はその代名詞ともなっている。前にも述べたように、建築・土木の分野ではこれはチューンドマスダンパ(TMD)と呼ばれている。この機能をさらに向上させるために、セミアクティブ動吸振器、アクティブ動吸振器がある。建築・土木の分野ではこのアクティブ動吸振器をアクティブマスダンパ(AMD)と呼ぶ。さらに、アクティブ動吸振器ではエネルギーの補給ができない時間問題なので、これとパッシブ要素を組み合わせたハイブリッド一般化している。これをハイブリッドマスダンパ(HMD)と呼んでいる。

固定面利用型は乗り物のアクティブサスペンションが一般的である。相互反力利用型は最近提案されている新しい方法であり、まだ実用例は少ないが、大きな反力が得られるので建物の大地震に対する応答制御など、これから利用が期待されている。これらの応用事例は後に述べる。

アクティブ制御技術の発達は従来の構造物の概念を変えつつある。たとえば、目下建設中の来島大橋はアクティブ制御を前提として設計されており、従来の主塔に比べて格段に軽量でスリムな構造が可能になった。それは主塔を多モード振動制御することにより、渦励振振動が防止できるようになったことによる。建築工学の分野でも、更なる超高層ビルの出現による多モード制御の要求が高まっている。このような構造物は厳密には無限次元を有する分布定数系である。来世紀に建設が予定されている大規模宇宙構造物もこのような対象の1つである。振動制御のためには無次元系を有次元系に近似することは避けられない。そのような近似によって表された制御対象を低次元化モデルという。この低次元化モデルによって制御系を設計し制御するとき起こる問題がスピルオーバ不安定である<sup>4)</sup>。これは無次元系と有次元系の相互干渉現象と捉えられている。この問題を制御系設計によって回避するためにH<sub>∞</sub>制御に代表されるロバスト制御が現れ<sup>5)</sup>、振動制御においても盛んに用いられている。

分布定数系構造物には必ず非制御モードが含まれるので、これを振動制御する際、常にスピルオーバの危険性を孕んでいる。したがって、分布定数系構造物の振動制御にはスピルオーバを防ぐロバスト制御が不可欠である。H<sub>∞</sub>制御はその有力な手段として登場してきた。しかし、この方法で多数のモードの振動を制御するにはコントローラが肥大になることから、簡便なロバスト制御

ビル名	場所	完成年	高さと階数	制振装置種類と台数	アクチュエータ	主塔名	高さ、重量	制御周波数範囲(Hz)	アクティブ質量、台数	制御方式	制御モード数
京橋聖和ビル	東京	1989	11階建 33m	AMD 2	油圧	レインボーブリッジ 第一主塔	119m 4800ton	0.26~0.95	6ton 2	フィードバック制御	3
横浜ランドマークタワー	横浜	1993	76階建 296m	HMD 2	サーボモータ	レインボーブリッジ 第二主塔	117m 4800ton	0.26~0.55	2ton 1	DVFB	1
長期信用銀行ビル	東京	1993	21階建 129m	HMD 1	油圧	白鳥大橋 第一主塔	127.9m 2400ton	0.13~0.68	9ton 1	準最適制御	1
ホテル日航金沢	金沢	1994	29階建 131m	HMD 2	油圧	白鳥大橋 第二主塔	131m 2500ton	0.13~0.68	4ton 2	DVFB	1
広島リーセントロイヤルホテル	広島	1994	35階建 150m	HMD 1	サーボモータ	明石海峡橋 主塔	293m 24650ton	0.127	28ton 2	LQ/DVFB	1
新宿パークタワー	東京	1994	52階建 227m	HMD 3	サーボモータ	名古屋中央橋 第一主塔	190m 6200ton	0.18~0.42	8ton 2	$H_{\infty}$ 制御	1
MHI横浜ビル	横浜	1994	34階建 152m	HMD 1	サーボモータ	第一米島大橋 第一主塔	112m 1600ton	0.23~1.67	6ton 2	準最適制御	3
浜松ACTタワー	浜松	1994	46階建 212m	HMD 2	サーボモータ	第一米島大橋 第二主塔	145m 2400ton	0.17~1.70	10ton 2	$H_{\infty}$ 制御	3
リバーサイド墨田	東京	1994	33階建 134m	AMD 2	サーボモータ	第二米島大橋 第一主塔	166m 4407ton	0.17~1.06	10ton 2	DVFB/ $H_{\infty}$	2
宮崎フェニックスホテル	宮崎	1994	43階建 154m	HMD 2	サーボモータ	第二米島大橋 第二主塔	143m 4000ton	0.20~1.45	10ton 2	フィードバック制御	3
大阪WTCビル	大阪	1994	52階建 252m	HMD 2	サーボモータ	第三米島大橋 第一主塔	179m 4600ton	0.13~0.76	11ton 2	可変ゲインDVFB	1
臨空ゲートタワー北ビル	大阪	1995	56階建 255m	HMD 2	サーボモータ	第三米島大橋 第二主塔	179m 4600ton	0.13~0.76	11ton 2	$H_{\infty}$ 制御	1

表-1 高層ビルと建設時の長大橋主塔とアクティブ制御例

の要請もある。

図-2には3通りのロバスト制御の特徴をブロック線図で示す。フィルタ包含ロバスト制御は、ローパスフィルタを含めてLQ制御系を設計し非制御モードの感度低減を図る方法である。各図において、係数行列A, Bに掛かる添字fとcは各々フィルタと制御対象を意味する。またu, x, yは制御、状態および観測ベクトル、Kは状態フィードバックゲインベクトル、Cは観測行列である。ローパスフィルタはパーソナルコンピュータからなるコントローラの中で作られないので構成が最も簡単である。

ロバスト性を損なうシステム誤差には、乗法的誤差と加法的誤差がある。前者はシステムのパラメータ変動などによって起こる。後者は一般に無視した高次モードによってもたらされる。この図において、 $W_1$ は加法的誤差に対する重み関数、 $W_2$ は乗法的誤差に対する重み関数である。 $w$ は外乱ベクトルである。 $H_{\infty}$ 状態フィードバック制御は、制御対象に2種類のフィルタ含めた拡大形にして1つのRiccati方程式を解いて状態フィードバック則を決定し、状態フィードバックするので、比較的簡素に制御系が構成できる。 $H_{\infty}$ 出力フィードバック制御は、オブザーバを含む制御系が構成できる利点があるが、2つのRiccati方程式を満たすコントローラが動的補償器となり肥大化する問題がある。制御するモード数が増えると、コントローラをパーソナルコンピュータに実装することは難しくDSPが不可欠となる。

## ☆ 応用分野とその事例

最近発表されたアクティブ振動制御の実システムへの応用に関する大変興味あるレポートがある。IEEEから出版されたジャーナルControl Systemsに組まれた特集号<sup>6)</sup>に、日本の高層ビル、長大橋主塔等のアクティブ振動制御事例が克明に紹介されている。1989年に完成した京橋聖和ビル、1993年のランドマークタワーなど、すでに我が国では23棟のアクティブ制御された高層ビルが建設されているが、それらについて建設場所、完成年、ビルの規模、制御方式、制御装置の数、アクチュエータ機器等きわめて細部に渡って紹介されている。さらに、長大橋主塔の建設時の風による渦励振振動事例についても、そのレポートは我が国で実施された15件の事例を詳細に紹介している。その内の高層ビルと主塔構造物について、代表的な各12例を抜粋して表-1に要点をまとめた。このようにアクティブコントロール技術が最も活用されているのは建築・土木の分野である。

図-3は長大橋主塔の代表的なアクティブ制御装置を示す。建設時の主塔は強風を受けると渦励振振動が発生する。それを防ぐために、従来はパッシブ装置が用いられていたが、最近はアクティブ制御装置にとって代わった。それは装置が小型にできること、建設時のパラメータ変動に強いこと、多モード制御ができること等の理由による。しかも、1組のアクティブ制御装置によって多モード制御が可能なことを活用すれば、思い切った主塔の重

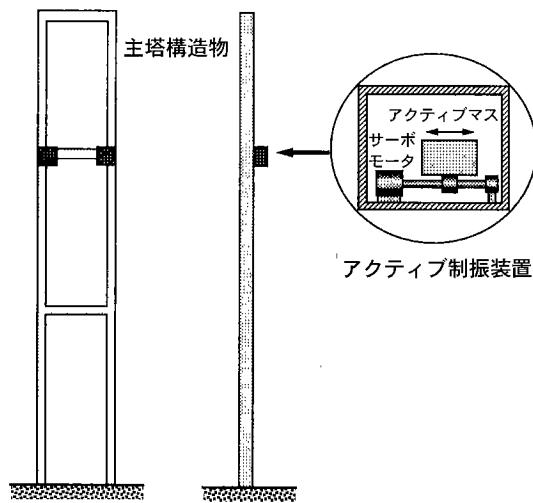


図-3 長大橋主塔の渦励振制御例

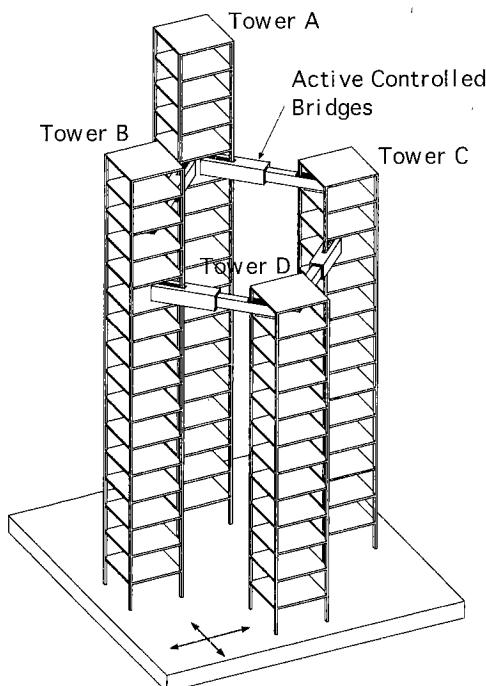


図-4 4棟連結ビルのアクティブ制御法

量軽減、スリム化が図られる。表-1の来島大橋がその最初の実施例である。また、前述したように6本の主塔はいずれも異なった制御手法が試されており、まさに制御手法の実験場となっている。このような環境を提供できる場は今のところ我が国以外にはない。

以上に述べたように、アクティブ振動制御の実用例は建築・土木分野が目立っているが、機械工学の分野でも情報機器の性能向上、回転体の高速化等のためにアクティブコントロール技術が活用されている。

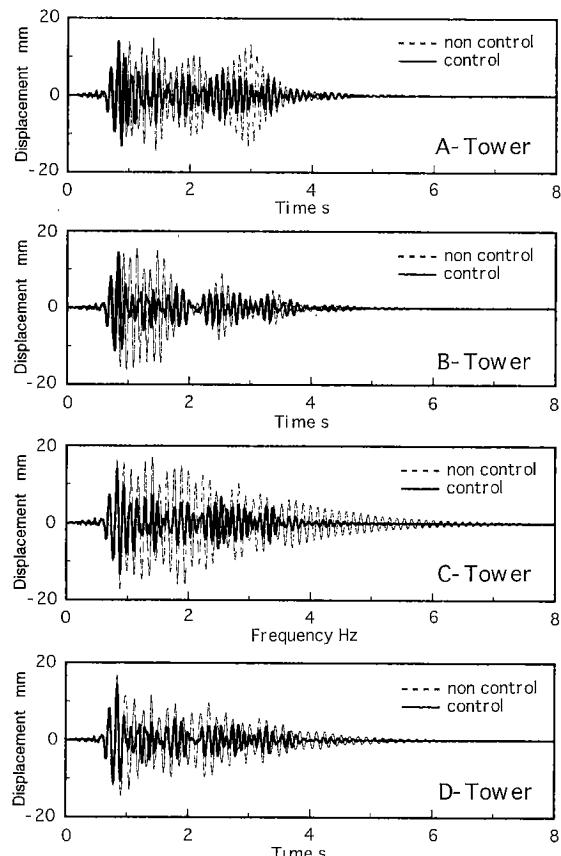


図-5 各棟の地震応答の制御・非制御時の比較

## ★ 導入の効果

ここでは、著者らが進めている研究の内の2例を取り上げ、アクティブコントロール導入の効果を紹介する。

### 相互反力利用によるビルの地震応答制御<sup>7)</sup>

高層ビルや長大橋主塔構造物に用いるAMDやHMDなど補助質量の慣性力をを利用する制振法は、風や小地震を対象に開発されたものであり、大きな制振力を得ることが難しい。その問題は相互反力を利用した制振法で解決できる。図-4はこの考え方を具現化した4棟の超高層ビルをアクティブブリッジと呼ぶアクティブ制振装置による連結制振法を示す。ビル相互の反力を利用するので、巨大地震にも対応できる大きな制振力が得られる。図-5には、阪神淡路地震波を用いて4棟の地震応答制御結果をシミュレーションしたものである。各ビルはお互いにアクティブ制御ブリッジによって結合されており、相互に地震応答制御を行っていることが分かる。なお、実験においても同様な結果を得ている。

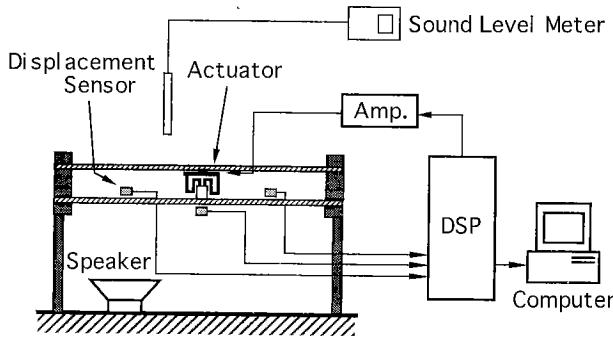


図-6 アクティブ遮音系の構成

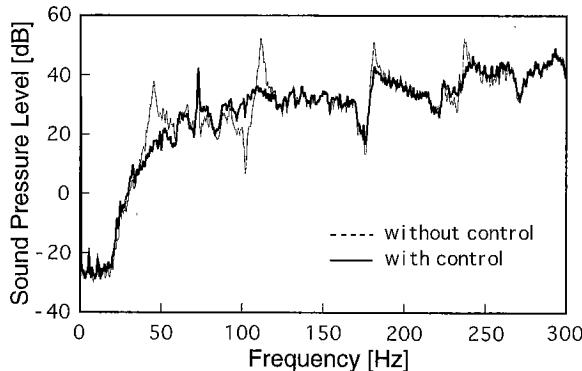


図-7 放遮音圧の測定による遮音効果の実証

### アクティブ遮音<sup>8)</sup>

最後に、環境振動騒音制御のアクティブ遮音による方法について紹介する。従来の遮音には鉛入りの壁等の重量壁が用いられてきた。しかし、高層ビルにはこの方法は適さない。そこで、薄い板壁をアクティブ制御することによる遮音法について検討する。

図-6はこの方法の可能性を調べるために構成した実験装置を示す。騒音源を含むボックスは厚さ1mmの薄い板によって遮蔽されている。しかし、板は多数の振動モードを有するので、その固有振動数付近では返って騒音が増幅されて放射されることになる。そこで、各振動モードを振動制御することによって広い周波数範囲で遮音性を高めようとするのがこの研究の狙いである。板の振動制御には、1次から9次までの振動モードを制御するために、9質点モデルが作成された。

この実験装置で得られた音圧測定結果を周波数スペクトルによって図-7に示す。これは150mm上方でマイクロホンにより放遮音を拾い、FFT解析器で分析したものである。放遮音に大きく関係する300Hzの間にある4つのピークは制御によってよく抑制されている。

この効果がより直感的に分かるように、特に騒音放射が問題となるモードの共振周波数付近で音圧加振した時の非制御と制御時の比較による時系列データで示したも

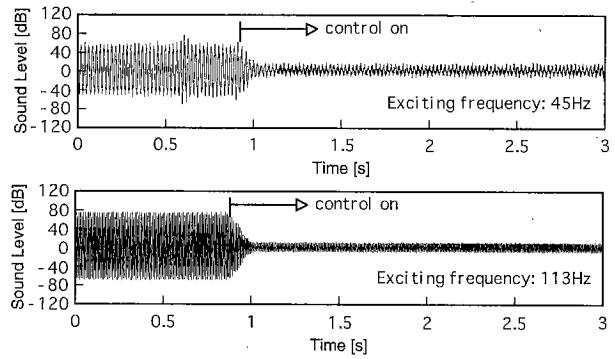


図-8 放遮音の抑制効果の実測

のが一例を図-8である。制御によって各共振ピーク周波数付近の放遮音は1/5程度に低減していることが分かる。

### ☆ これからのアクティブ制御技術

振動のアクティブコントロール技術は、コンピュータの進歩、DSP等のコントロールデバイスの発達、制御理論の普及に支えられて実用段階に達した。しかし、忘れてならないのは、モード解析技術の発展に伴って振動が可視化できるようになったことと振動解析技術の進歩である。また、それらを総合した振動制御のためのモデリング技術の進歩が多モード制御を可能にした。本稿で事例を示したように、建築・土木の分野で居住性や快適性を増すために盛んにアクティブコントロール技術が用いられ始めたが、騒音も振動が原因である場合が多いので、本稿の最後で述べたようなアクティブ遮音技術も今後注目される技術に発展できると思っている。

本稿が情報処理の分野で些かなりとも参考になれば幸いである。

### 参考文献

- 富成 襄、背戸一登、神山修一: 電気油圧式サーボダンパーに関する研究、機講論、704-11, pp.23-25 (1970).
- Seto, K.: Trends on Active Vibration Control in Japan, Proceedings of the 1st Motion and Vibration Control, pp.1-11 (1992).
- 背戸: 振動のアクティブ制御、日本音響学会誌、47-9, p.668 (1991).
- Balas, M. J.: Toward A More Practical Control, Theory for Distributed Parameter Systems, in Control and Dynamic Systems, Academic Press, N.Y., pp.361-421 (1982).
- Doyle, J. C. and Stein, G.: Robustness with Observers, IEEE Transactions on Automatic Control, 24-4, pp.607-611 (1979).
- Spencer, B. F. Jr. and Sain, M. K.: Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, IEEE Control Systems, 17-6, pp.19-35 (1997).
- 松本幸人、背戸一登、土井文夫: 多連ビル構造物のアクティブ振動制御(第1報、4連ビル構造物の地震応答制御)、日本機械学会論文集C編、64-624, pp.2840-2846 (1998).
- Seto, K., Ren, M. and Doi, F.: Feedback Vibration Control of a Flexible Plate at Audio Frequencies by Using a Physical State-space Approach, The Journal of the Acoustical Society of America, 103-2, pp.924-934 (1998).

(平成10年11月2日受付)