

# 構造振動を考慮した能動的音響制御手法の開発

## Development of Active Sound Control Technique in Consideration of Structural Vibration

精密工学専攻 36 号 藤井 健司  
Fujii Kenji

### 1. はじめに

近年、環境に対する関心が高まっており、音響工学の分野では、音環境改善のために家電製品や車などから発生する騒音の低減が盛んに行われている。騒音は空気伝播音と固体伝播音に大別されるが、一般的に前者に対しては吸音材を配置したり、後者に対しては制振材や、構造変更などの受動的制御によって静音化を実現している。しかし、吸音材や制振材は高周波数帯域では大きな効果が得られるが、低周波数帯域ではその限りではなく、また構造変更も経年変化による問題や広い周波数帯域における騒音の制御を得意とはしていない。

こういった問題点に対して、現在、低周波数帯域において効果的な手法である能動的制御手法が研究されている。この手法はある参照点で観測された信号に対し、逆相、かつ同振幅の信号を加えることで参照点における信号を打ち消すという単純な理論に基づくものである。

騒音は先に述べたとおり、空気伝播音や固体伝播音に大別されるが、空気伝播音に対しては能動的音響制御または能動的騒音制御 (Active Noise Control, 以下 ANC) と呼ばれる音を音で低減する手法を行い、固体伝播音に対しては能動的振動制御 (Active Vibration Control, 以下 AVC) を行い、騒音の原因となる振動現象そのものを抑制することで、騒音の低減を実現することが可能となる。

近年では、連成現象に着目したもの<sup>(1)・(2)</sup>、境界要素法を適用したもの<sup>(3)</sup>、放射音響パワーに着目したもの<sup>(4)</sup>、また、新たに騒音発生現象を定式化し、独自のパラメータを用いて制御を行うもの<sup>(5)</sup>等、さまざまな報告<sup>(6)</sup>がされている。これらの手法は複雑な制御則によって成り立ち、情報演算機器の高性能化により実現可能となっている。また、非常に高い制御効果を示し、グローバルな制御を可能としている。

しかし、上記の制御手法には多数のセンサや制御点、高価な演算装置が必要となりコストの問題から実用化が難しい場合もある。そこで従来の制御手法に比べて、少数のセンサや制御点で効果的な制御が実現すれば、能動的な制御手法がより実用的なものになることから、小規模のシステムで効果的な制御を目的とする研究も行われている<sup>(7)・(8)・(9)</sup>。

本研究では、モード行列を用いた参照点選定手法により、従来よりも少数の参照点で一定の制御効果をあげる手法を提案する。また構造-音響連成場を定式化し、同様の手法が適用できるかどうかを検証する。

### 2. 能動的音響および振動制御則

制御時における参照点の応答誤差  $\mathbf{e}$  は以下で示される。

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_o + \mathbf{H}\mathbf{q} \quad (1)$$

さらに、誤差の二乗和  $\mathbf{e}^2$  は二次形式として次式に示される。

$$\mathbf{e}^2 = \mathbf{q}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{q} + \mathbf{q}^H \mathbf{H}^H \mathbf{X}_o + \mathbf{X}_o^H \mathbf{H} \mathbf{q} + \mathbf{X}_o^H \mathbf{X}_o \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{q}$  は制御入力ベクトル、 $\mathbf{H}$  は参照点と制御入力点

間の伝達関数ベクトル、 $\mathbf{X}_o$  は参照点における応答ベクトルであり、行列の上付き文字<sup>H</sup>は複素共役転置である。この二乗和を評価関数とし、これを最小にすることを考える。 $\mathbf{q}$  は複素数であることから、式(2)を  $\mathbf{q}$  の実部、虚部でそれぞれ偏微分し、二つの式を得る。それぞれを零とし連立方程式を解くと、最適な制御入力を得ることができる。その結果は以下のようなになる。

$$\mathbf{q} = -\mathbf{H}^+ \mathbf{X}_o \quad (3)$$

ここで、 $^+$  は擬似逆行列を示す。

### 3. モード行列を用いた参照点選定手法とその効果

#### 3.1 モード行列を用いた参照点選定手法

実験モード解析や有限要素解析より得られる振動および音響モード行列  $\Phi$  に処理を加え、参照点を選定する。モード行列  $\Phi$  は、

$$\mathbf{X} = \Phi \boldsymbol{\gamma} \quad (4)$$

で定義される行列である。ここで、 $\mathbf{X}$  は参照点における応答、 $\boldsymbol{\gamma}$  はモード振幅である。

Fig. 1 に選定手法の概要を示す。まず、モード行列における各モードのベクトルの最大値を 1 としてモード毎に正規化を行い、その後正規化されたモード行列を各参照点で足し合わせる。作成された行列は、参照点数  $\times 1$  となるベクトルであり、各行の値は、参照点における全モードの寄与を表すものと捉えられる。この値の大きな順に点を選ぶことにより、参照点を決定する。なお、本手法は全モードを等価に扱い、相互の位相を考慮しないが、実用的な選定手法であるといえる。

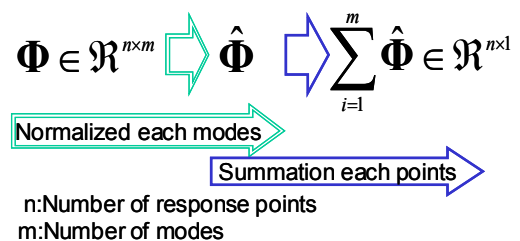


Fig. 1 Method of picking reference point

#### 3.2 提案手法の音響場への適用

閉空間内に騒音源と制御音源が存在する音響場を想定し、提案手法を適用した音響制御 (ANC) を行い、その制御効果をエネルギーの変化を観測することで確認する。Fig. 2 に検討に用いたモデルと選定された参照点の位置、Fig. 3 に閉空間内において 500Hz までに存在する音響モードシェイプ、Fig. 4 に参照点数を増やした際の、閉空間内のエネルギーの変化を示す。なお閉空間を形成する外壁は剛体とする。

ここで音響エネルギーの変化に着目する理由として、音響エ

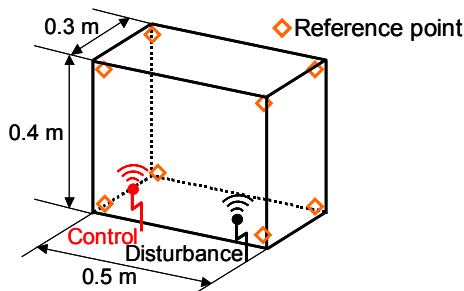


Fig. 2 Analytical acoustic model and location of reference point

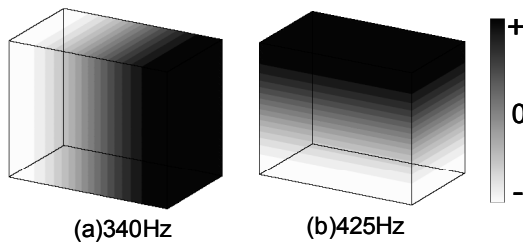


Fig. 3 Acoustic modal shapes in natural frequencies of closed cavity

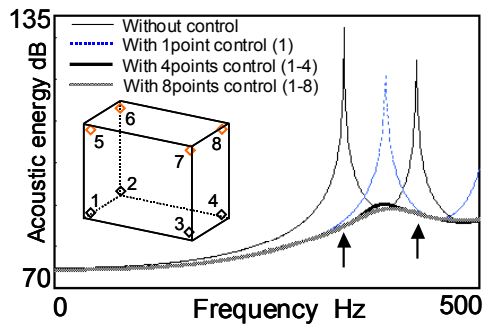


Fig. 4 ANC effect variation by increasing reference point

エネルギーが音圧の二乗和に比例することが挙げられる<sup>(9)</sup>. 本研究では参照点での応答の二乗和を評価関数と置いていること、少数の参照点で効果的にグローバルな制御を実現することを目指していることから、音響エネルギーに着目して制御効果を確認することは妥当であるといえる。

矢印で示すピークは非制御時における閉空間内部の音響固有周波数で、500 Hz までに 340 Hz, 425 Hz が存在する。Fig. 4 より参照点数を増やすことで固有周波数におけるピークを低減し、良好な制御を実現するが、その効果は参照点数を増やすごとに下がることがわかる。この例では参照点数 4 点と 8 点で制御効果に変化があまり見られないことから、参照点数が 5 点以上の制御効果は期待できない。これより、提案手法を用いて適切な参照点位置と点数を選定することによって、少数で効果的な ANC が可能であることがわかる。

### 3.3 提案手法の振動場への適用

音響場と同様の検討を板構造の振動場における振動制御 (AVC) に適用し、振動エネルギーの変化を調べる。制御対象となる板構造は周辺完全支持の矩形平板とし、板厚は 0.001 m である。検討に用いたモデルと選定された参照点の位置を Fig. 5 に示す。Fig. 6 に板構造のもつ振動モードシェイプ、Fig. 7 に参照点数を増やした際の制御効果の変化を示す。ANC の場合と同様、参照点数が増えるにつれ制御効果が上がっているおり、また、振動場においても 4 点と 8 点で制御効果に大きな差異がないことが確認できる。以上より、振動場に対する AVC においても ANC と同様に少数の参照点で効果的

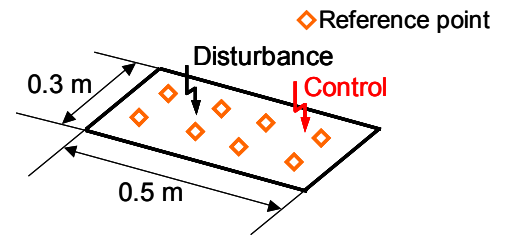


Fig. 5 Analytical structural model and location of reference point

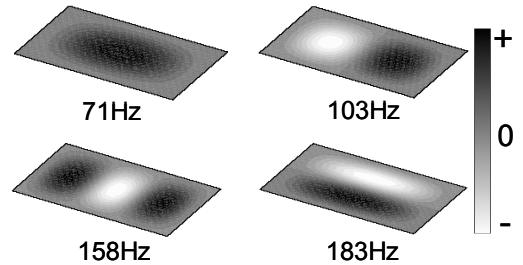


Fig. 6 Structural modal shapes in natural frequencies of vibration plane

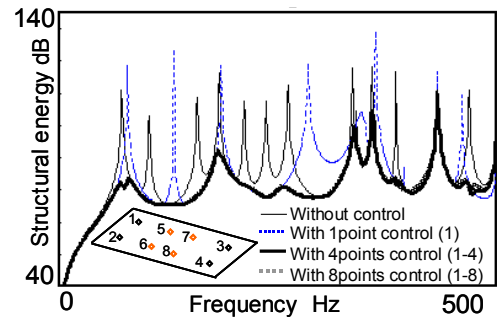


Fig. 7 AVC effect variation by increasing reference point

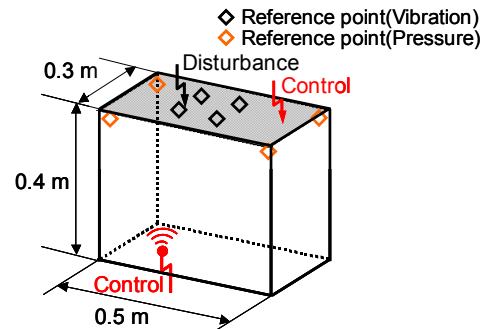


Fig. 8 Analytical coupling model and location of reference point

な制御を行うことが可能である。

## 4. 構造-音響連成場における提案手法の適用

### 4.1 振動場および音響場を独立に考慮した制御効果の確認

閉空間のある一面が振動する構造-音響連成場 (以下連成場) に提案手法を適用し、制御効果を確認する。この際、振動場と音響場を独立に考慮して式 (3) より振動、音響それぞれの制御入力を導出し、制御を行う (ANC, AVC)。Fig. 8 に検討モデルの概要と選定された参照点を示し、Fig. 9 に制御効果を示す。ここで参照点選定に用いたモード行列は連成を考慮している。

振動場と音響場を独立して考慮した場合、導出される制御

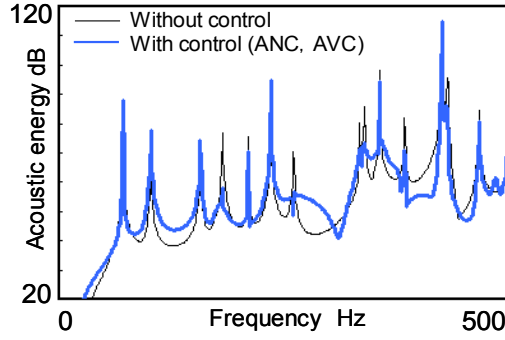


Fig. 9 Control effect of ANC, AVC in consideration of vibration and acoustic independently

入力は連成現象を全く考慮していないものとなる。Fig. 9を確認すると、ほぼすべての周波数帯域において制御効果はほとんどなく、むしろ悪化した周波数帯域を確認することもできる。これより、新たに連成を考慮した式を考える必要があることが言える。

#### 4.2 振動場および音響場を同時に考慮した制御効果の確認

制御対象を連成場内部の音圧とした時、制御時の音圧誤差  $e_p$  を以下のように定義する。

$$e_p = P_o + Gf_c + Zp_c \quad (5)$$

ここで、 $P_o$  は外乱入力時の参照点の音圧、 $f_c$  は制御振動入力、 $p_c$  は制御音響入力、 $G$  は  $f_c$  入力と参照点の音圧との伝達関数ベクトル、 $Z$  は  $p_c$  入力と参照点の音圧との伝達関数ベクトルである。この時、誤差二乗和  $e_p^2$  は二次形式として次式で示される。

$$\begin{aligned} e_p^2 = & p_c^H Z^H Z p_c + p_c^H Z^H G^H f_c + p_c^H Z^H P_o \\ & + f_c^H G^H Z p_c + f_c^H G^H G f_c + f_c^H G^H P_o \\ & + P_o^H Z p_c + P_o^H G f_c + P_o^H P_o \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)を  $f_c$ 、 $p_c$  それぞれの実部、虚部で偏微分し、4つの式を得る。それらを零とし、得られた連立方程式を解くことによって、定義した音圧誤差二乗和を最小とする最適解を求めることができる。得られた制御入力を以下に示す。

$$\begin{aligned} f_c = & (G^H G - G^H Z (Z^H Z)^{-1} Z^H G)^{-1} \\ & \times (G^H Z (Z^H Z)^{-1} Z^H - G^H) P_o \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p_c = & (Z^H Z - Z^H G (G^H G)^{-1} G^H Z)^{-1} \\ & \times (Z^H G (G^H G)^{-1} G^H - Z^H) P_o \end{aligned} \quad (8)$$

式(3)を用いて振動場の振動を参照して AVC のみを行った結果および式(7)、(8)より得られた  $f_c$ 、 $p_c$  を用いて同時に制御を行った結果(AVC+ANC)を Fig. 10 に示す。ANC+AVC の概要は、Fig. 8 において振動参照点を排したものである。この制御は、AVC のみと比べて Fig. 10 点線の丸印で示す周波数帯域において効果が見られないことが確認できる。しかし、Fig. 10 矢印で示す連成時の音響固有周波数 340 Hz と 427 Hz 付近においては、AVC と比べて良い制御効果が得られていることが確認できる。

連成現象を考える際、エネルギーは振動場から音響場、音響場から振動場といったように振動場と音響場を行き来しているため、連成を考慮する際にはこの現象を式の中に含む必要がある。しかし、現状このモデリングを行うには参照点を多く取る必要があり、それに伴い参照情報は膨大なものになる。本研究は、少数の参照点で効果的な制御を行うことを目標と

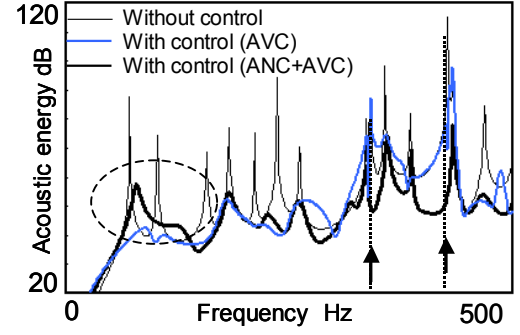


Fig. 10 Control effect variation by difference of control input

しているため、参照情報は少ない。この少数の参照点という制約の元に定式化した式(6)は、振動場から音響場への影響と、音響制御入力が音響場における影響のみを考慮していることになり、音響場が振動場に与える影響が考慮されていない。よって連成場を簡易的にモデリングしていることになり、誤差が存在する。

さらに、一般的に、振動レベルは高周波数帯域に比べて低周波数帯域で高いことから、低周波数帯域では振動場が連成場に与える影響が大きくなり、モデリングの誤差が低周波数帯域で大きくなる。これらが原因となり、低周波数帯域では誤差が大きいことにより制御効果の低下を招き、連成時の音響固有周波数付近では誤差が低周波数帯域に比べて小さいため、効果的な制御を実現していると考えられる。

ここで、この二つの連成固有周波数付近において制御効果に違いがあることがわかる。340Hz における制御効果は 29dB であるのに対し、427Hz では 60dB と大きく異なっている。二つの連成固有周波数における音響モードシェイプは Fig. 3 における非連成音響モードシェイプと同様の音圧分布を持ち、340 Hz は Fig. 3 (a) に、427 Hz は Fig. 3 (b) に対応している。

340Hz では振動面の振動方向に対して音響場の音圧分布が直交しているのに対し、427Hz では振動面の振動方向に対して音響場の音圧分布が平行していることが確認できる。構造-音響連成現象において、振動面の振動方向に対し音響場の音圧分布が平行な音響モードシェイプを持つ連成時の音響固有周波数は、振動によって音響モードを強く励起されることがわかっている。つまり、この振動に対して制御入力を加えれば、励起されやすい音響モードシェイプをもつ連成固有周波数で大きな効果が得られると考えられる。よって、ANC に加えて AVC を行うことで振動方向に対して音響場の音圧分布が平行となる音響モードシェイプを持つ連成固有周波数である 340Hz において大きな効果が得られたと判断できる。

続いて、振動面を変更し上記と同様の検討を行い、制御効果に同様の傾向を得られるかどうかを確認する。Fig. 11 に解析に用いたモデルと参照点の概要を示す。Fig. 12 に式(3)を用いて AVC のみを行った結果、および式(7)、(8)より得られた  $f_c$ 、 $p_c$  を用いた制御と、制御入力の違いによる制御効果の変化を示す。

Fig. 10 における結果と同様に、Fig. 12 点線の丸印で示す低周波数帯域ではあまり制御効果が得られていないものの、図中矢印で示す連成固有周波数付近においては良好な制御効果が得られていることがわかる。先の検討と同様に二つの連成固有周波数に着目すると、340Hz では 60dB 低減できているのに対して、427Hz では 40dB の低減となっており、制御効果に差が出ている。このケースでは、340Hz において振動面の振動方向に対し音響場の音圧分布が平行な音響モードシェイプが存在している。



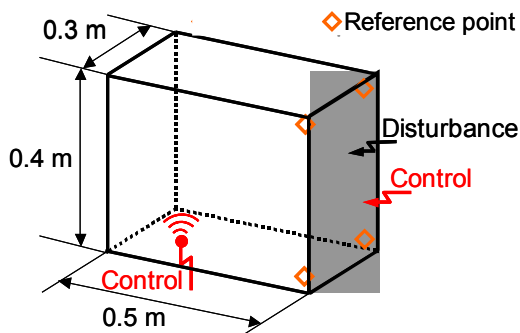


Fig. 11 Analytical coupling model that changed vibration plane and location of reference point

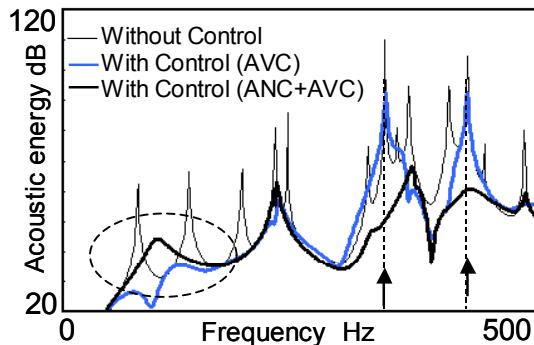


Fig. 12 Control effect variation by difference of control input (ANC / ANC+AVC)

以上より、振動面を変更した場合においても良好な制御効果が確認でき、提案手法を連成場に適用した場合においても一定の効果をj得ることが可能であるといえる。

#### 4.3 音圧を参照した制御振動入力による連成場の制御効果の確認

式(3)において音圧を参照情報とし、 $f_c$ と $f_c$ 入力時の参照点の音圧との伝達関数ベクトルである $G$ を用いて制御振動入力を与え、閉空間内部の音響制御を行う(RefP-AVC)。概要は、Fig. 11において音響制御入力を排し、振動制御入力のみで音圧を制御するものである。この制御は制御音響入力を必要としないため、4.3節で提案した制御に比べ、少ない制御入力で制御をすることが可能となる。Fig. 13にAVC+ANCによる制御効果とRefP-AVCによる制御効果を示す。

Fig. 13より、低周波数帯域において、RefP-AVCが非常に良好な制御効果を示していることがわかる。RefP-AVCにおいて制御振動入力 $f_c$ を導出する際、制御音響入力を用いていないことから式(3)を用いているが、これにより、式(6)におけ

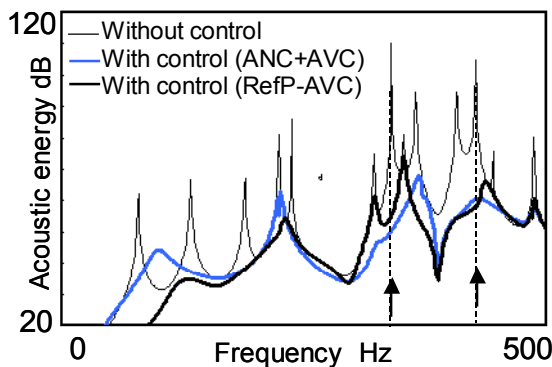


Fig. 13 Control effect variation by difference of control input (ANC+AVC / RefP-AVC)

る制御音響入力 $p_c$ が振動場に与える影響による誤差が存在しない。これにより誤差が小さくなっており、低周波数帯域における制御効果向上の一因となっている。

振動面の振動方向と音響モードシェイプに着目した制御効果の差異も先の検討と同様に確認できる。340Hzでは58dBに対し、427Hzでは46dBとなっており、振動面の振動方向と音響モードシェイプの形状の関係性による制御効果の傾向が同様に現れている。また、振動面の振動方向と音響モードシェイプに起因する連成の影響が大きい音響固有周波数に関してはRefP-AVCがANC+AVCよりも制御効果が低いが、連成の影響が小さい音響固有周波数においては、RefP-AVCとANC+AVCの制御効果は同等である。

以上より、制御効果に差異はあるもののほぼ同等の結果を得られていることから、RefP-AVCが実用上十分な効果をj得られる最も有効な手段であるといえる。

## 4. 研究成果

- (1) モード行列を用いた参照点選定手法を提案し、振動場および音響場において適切な位置、数の参照点を選定することで効果的な制御が可能であることを、エネルギーを確認することにより示した。
- (2) 振動場、音響場、構造-音響連成場における制御モデルを定式化し、その制御効果を確認した。また、構造-音響連成場において定式化した制御モデルの誤差を確認し、制御効果への影響を示した。
- (3) 構造-音響連成場に対して、音圧を参照し制御振動入力を与える制御により、実用上最も効率よく制御を行える有効な手段であることを確認した。

## 参考文献

- (1) 貝塚勉他、能動音響制御および能動振動制御による強連成閉空間場における騒音の抑制について、日本機械学会[No. 04-5] Dynamics and Design Conference 2004 CD-ROM論文集, “315-1” - “315-6”, (2004-9)。
- (2) 小林こずえ他、能動騒音制御および能動振動制御による閉空間場における音響ポテンシャルエネルギーの最小化(構造/音響の強連成場について)、日本機械学会論文集(C)70(690), 363-370, (2004-2)。
- (3) 伊勢史郎、キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理、日本音響学会誌53(9), 706-713, (1997)。
- (4) 小林こずえ他、能動音響制御および能動振動制御による振動放射音響パワーの最小化、日本機械学会論文集(C編)68(669), 78-85, (2002-5)。
- (5) 貝塚勉他、構造場と音響場の統一的直交因子の定式化と制御-閉空間の場合-, 日本音響学会誌 63(10), 585-592, (2007)。
- (6) 平山真吾他、モード制御と適応制御の併用による3次元空間の能動的音響制御、日本機械学会第13回環境工学総合シンポジウム2003講演論文集, 53-54, (2003)。
- (7) 浅野太他、閉空間音場のアクティブ等化とこのための音源最適配置について、信学技報, EA94-22, 21-28, (1994-06)。
- (8) 伊勢友彦他、モードのアクティブ制御に着目した等化器の構成に関する一検討、信学技報, UA98-97, EA98-113(1999-1)。
- (9) 藤井健司他、振動を考慮した能動的音響制御手法の開発、日本音響学会講演論文集, (2008-3)。
- (10) P.A. Nelson & S.J. Elliot, Active Control of Sound, Academic Press, London, (1992)。