

# 透光性樹脂と圧電セラミックスピーカを用いた アクティブ騒音制御の基礎的研究

大塚 健太

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

都市における産業活動の拡大、および人の移動や物流の増加に伴い、人々の生活環境における騒音被害は深刻な社会問題となっている。

たとえば、オフィスあるいは住居が幹線道路や鉄道に面している、飛行場の近くにあるなどの場合、遮音壁を建てるなどの伝搬過程での騒音対策が施されるが、それで十分な効果が得られない場合は建物での騒音対策が必要になる。建物の外皮で最も騒音に弱いのは開口部である。一般的な建物開口部の騒音対策は、防音型サッシや二重窓の使用などの音響的にパッシブな手法が用いられるが、これらの技術では低音域（およそ500Hz以下）の遮音が困難であるなどの課題がある。

1970年代ごろから、騒音に対してその騒音と逆位相の音を発生させ、音波干渉させることによって騒音を低減するアクティブ騒音制御 (Active Noise Control; ANC) 技術が研究されているが、昨今のデジタル信号処理技術の発展に伴い、この技術を現実のものとする可能性が急速に高まっている<sup>1,2)</sup>。しかも、ANCは低音域での高い消音効果が期待されることから、従来の騒音対策技術と相補する技術として実用的価値が高いとされている。

### 1.2 研究の目的

建物の遮音性能を上げる場合、開口部にANCを応用し、室内との境界面で消音することが有効である。しかし、ANCの制御用スピーカ（二次音源）に一般のコーン型スピーカを使用すると、開口部を覆うように連ねて設置する必要があり、採光を損なう。

本研究の目的は、通風や採光などの開口部の機能を損ねずに遮音性能を向上させる建物開口部用ANCシステムを構築することである。すなわち、板状の透光性樹脂を圧電素子により振動させる<sup>3,4)</sup>ことで音を発生させ、騒音と音波干渉させることができるANCシステムを構築することを目指している。このシステムをたとえば窓サッシ等に組み込むことによって、パッシブ技術だけでは実現が難しい軽量で低音域から制御できる理想的な開口部が提供できると考えている。

こうした目的を踏まえ、本論文では以下の2点につ

いて検討を行う。

- 透光性樹脂と圧電セラミックスピーカを組み合わせた二次音源を作成し、ANCに使用できるだけの音量が確保できるかを把握する
- 実験室内の単純な音場において、作成した二次音源によるANCの有効性を実験的に検討する

これらの検討により、採光を妨げない建物開口部ANCシステムの可能性と問題点の整理を行い、同システムに関する基礎的な知見を得ることができる。

## 2. 実験

透光性樹脂に圧電セラミックスピーカを貼付して二次音源を作成し、また、LMSアルゴリズムを制御理論として採用し<sup>5,6)</sup>、建物開口部におけるアクティブ騒音制御の消音効果を把握するための実験を簡易無響室で行った。

### 2.1 二次音源

作成した二次音源を図-1（右側）に示す。

これは、幅およそ950mm、高さ約1,900mmで建物開口部を模したものである。透光性樹脂は、できるだけ軽量であること、設置時に緩みが無いことを条件とし、厚さ2mmの亚克力板を採用した。

亚克力板に圧電セラミックスピーカを貼付し、それをANC用二次音源として使用する。電界を与えると歪みを生じる性質を持つ圧電素子あるいは電歪（ピエゾ）素子と呼ばれる物質があり、本論文で用いた圧電セラミックスピーカ（ED-W50-W：栄進電機株式会社

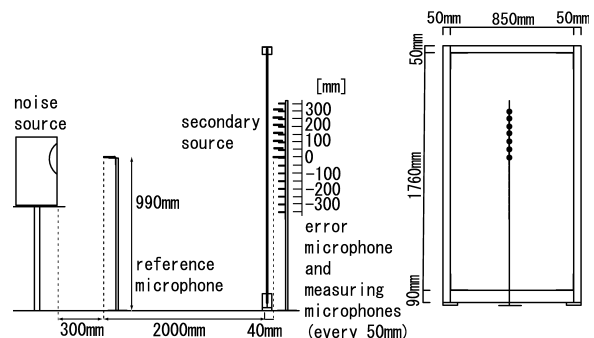


図-1 実験状況と二次音源

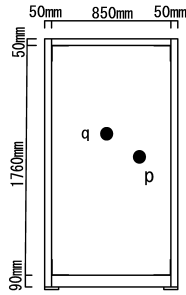


図-2 モードを考慮したときの加振点

p : 125Hz, 500Hz の腹 q : 250Hz の腹

社製) は、この原理を応用した音楽鑑賞を目的としたスピーカである。振動しやすいものに貼付し、電気信号を入力すると圧電セラミックスピーカの振動によって、貼付されている物体から音波が放射される。

## 2.2 固有モードの推定

物体は固有の振動モードを持ち、それに従って振動する。使用するアクリル板の固有モードを推定し、振動させやすい圧電セラミックスピーカの位置を検討することで、より効率の高い二次音源とすることができる。と考え、作成した二次音源について周辺単純支持の条件でアクリル板の固有振動数と固有モードを推定した。

振動理論によれば、長方形板の固有振動数  $f_{mn}$  は以下の式で求められる<sup>7)</sup>。

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]}$$

$D$  は板の曲げ剛性と呼ばれる定数で

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

と定義されている。荷重の作用していない均一で平衡状態の板の中立面内の直角座標をそれぞれ  $x$  および  $y$  として、 $a$  は  $x$  軸方向の板の寸法、 $b$  は  $y$  軸方向の板の寸法、 $E$  は弾性係数、 $\rho$  は密度、 $\nu$  はポアソン比、 $h$  は板の厚さを表す。 $m$  と  $n$  はそれぞれ  $x$  軸方向と  $y$  軸方向のモードを表す正の整数である。固有モードの推定に用いたアクリル板の物性値を表-1 に示す。

上式に基づいた 125Hz, 250Hz, 500Hz の固有モードの計算結果を表-2 に示す。また、図-3 に一例として 500Hz の固有モードの振動姿態を図示する。図-3 における白い部分はモードの腹、黒い部分はモードの節である。

## 2.3 二次音源の出力

作成した二次音源の出力を把握するために、500Hz 以下のオクターブ系列の純音を用いて、圧電セラミックスピーカをアクリル板の中央に貼付した場合と、2.2

表-1 固有モードの推定に用いたアクリル板の物性値

物性値	値
密度	1.19 g/cm <sup>3</sup>
ポアソン比	0.315
ヤング率	3,300 MPa

表-2 アクリル板の固有モードと実験に用いた腹の位置

周波数 (Hz)	モード (m,n)	腹の位置	記号 (図-2)
125Hz	(2,15)	(215,0)	p
250Hz	(1,22)	(0,40)	q
500Hz	(2,31)	(215,0)	p

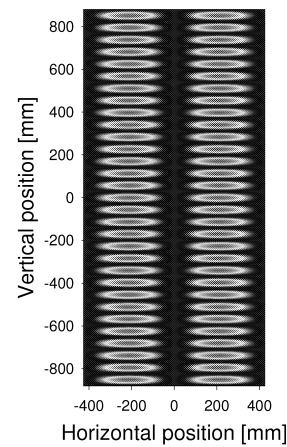


図-3 アクリル板の振動姿態 (500Hz)

で求めた固有モードの腹の位置 (図-2) に貼付した場合の 2 通りについて検討した。

図-1 (中央) に実験状況を示す。二次音源の中央から水平距離 40mm 離れた位置で、高さ方向に  $\pm 300$ mm の範囲に 50mm 間隔で並べた測定用マイクロフォンで 10s 間の平均音圧レベルを測定した。なお、作成した二次音源では 63Hz 以下は十分な出力が得られなかったため検討結果から除外した。以下の検討では 125Hz, 250Hz, 500Hz を対象とする。

## 2.4 LMS アルゴリズム

ANC には様々な制御理論が用いられているが、本論文では騒音の経時変化に逐次対応することができる適応アルゴリズムである LMS アルゴリズムを用いた。図-4 にブロック図を示す。

LMS アルゴリズムは、騒音源 (Primary Input) に関する情報である参照信号 (Reference Input) を参照マイクロフォンから、制御効果に関する情報である誤差信号 (Error Input) を誤差マイクロフォンからそれぞれ受け取り、誤差信号の値が小さくなるように、すな

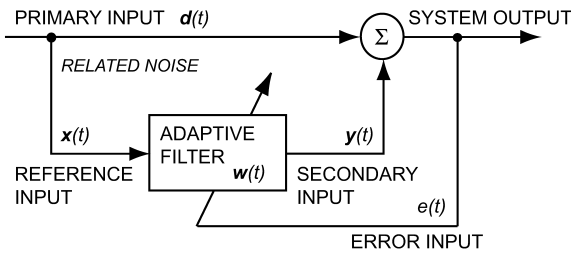


図-4 LMS アルゴリズム

わち騒音 (System Output) が減少するように最小二乗法の考え方をを用いてリアルタイムで二次音源からの出力信号 (Secondary Input) を望ましいものへと逐次調整するアルゴリズムである。

誤差信号の二乗を評価基準とし、ある瞬間における二乗誤差曲面上の勾配を求め、その最小値を探索する仕組みになっている。出力信号は、FIR (Finite Impulse Response) デジタルフィルタの係数を更新することによって調整される。その更新式は次のように示される。

$$\mathbf{w}_{k+1}(t) = \mathbf{w}_k(t) + \mu e(t)\mathbf{x}(t)$$

ここで、 $\mathbf{w}(t)$  はフィルタ係数、 $\mu$  はステップサイズパラメータ、 $e(t)$  は誤差、 $\mathbf{x}(t)$  は参照信号をそれぞれ表している。なお、ステップサイズパラメータは二乗誤差曲面上の移動の幅を表す係数である。

### 2.5 アクティブ騒音制御効果の検討

作成した二次音源を使用した LMS アルゴリズムの騒音制御効果を検討した。実験状況は、図-1 (左側) と同様である。二次音源の中心と誤差マイクロフォン、参照マイクロフォンは同一直線上に並ぶように配置した。

圧電セラミックスピーカの貼付位置は、アクリル板の中央とした。騒音源から 125Hz, 250Hz, 500Hz の純音を発し、ANC を作動させたとき (ON) と作動させていないとき (OFF) の二次音源背後における音圧レベル分布を測定した。騒音の回折や反射は ANC の ON / OFF に関係なく一定であると仮定し、ON と OFF のときの音圧レベル差を ANC による消音効果と見なした。

## 3. 結果と考察

実験の結果を図-5~図-7 に示す。図中で、横軸は二次音源上の高さ方向の位置 (図-1 参照) を表し、0 はアクリル板中央、正の値が上方、負の値が下方である。

### 3.1 二次音源の出力

アクリル板の中央に圧電セラミックスピーカを貼付した場合の二次音源出力を図-5 に示す。周波数ごとに圧電スピーカの能力を考慮した電流で実験したが、貼付位置付近ではいずれの周波数においても 60dB を超える音圧レベルを実現できた。

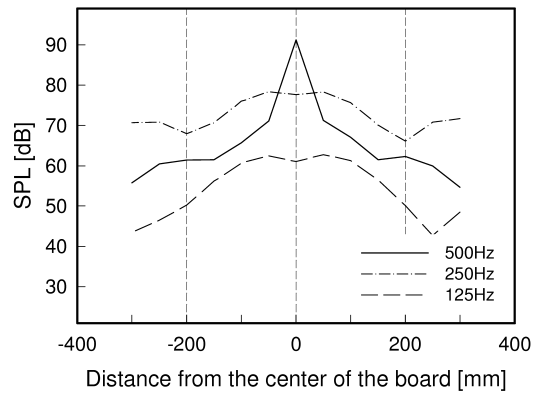


図-5 二次音源の出力 (中央を加振)

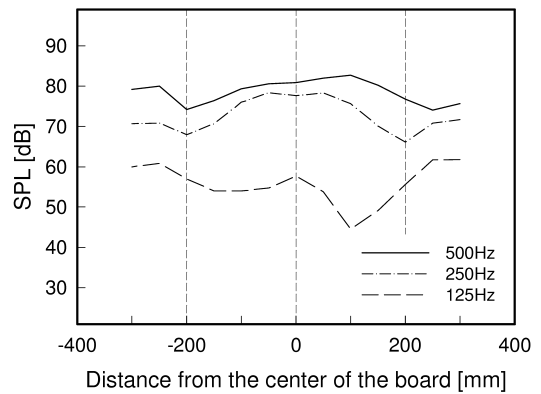


図-6 二次音源の出力 (モードを考慮)

音圧分布を見ると、圧電セラミックスピーカの貼付位置における出力が突出する傾向が見られた。特に 500Hz で顕著である。これは、アクリル板の中央位置はモードの節にあたり、圧電セラミックスピーカの振動がアクリル板の狭い範囲にしか伝わらなかったためと考えられる。局所的にしか ANC の効果が現れない可能性があり、開口部全体の騒音制御を考えると好ましくない。

そこで、表-2 に示す周波数ごとのモードを考慮して圧電セラミックスピーカの貼付位置を図-2 のように設定した。その結果得られた二次音源出力を図-6 に示す。特に 500Hz で顕著であるが、二次音源の音圧レベルが上昇し、音圧レベル分布が平坦になった。ただし、250Hz はアクリル板の中央位置がモードの腹に近かったため、両者に違いはあまり見られない。

### 3.2 アクティブ騒音制御の効果

ANC の消音効果を図-7 に示す。500Hz b のみ圧電スピーカがモードを考慮した位置にあり、そのほかの場合はアクリル板の中央にある。二次音源の出力分布と同様に、圧電セラミックスピーカの貼付位置を中心にほぼ対称に消音効果が現れた。圧電セラミックスピーカの貼付位置の付近では、いずれの周波数においても制御前に約 70dB であった音圧レベルが 30dB 以下ま

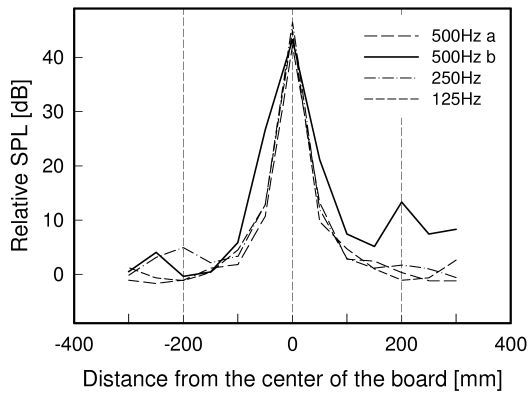


図-7 ANC の消音効果

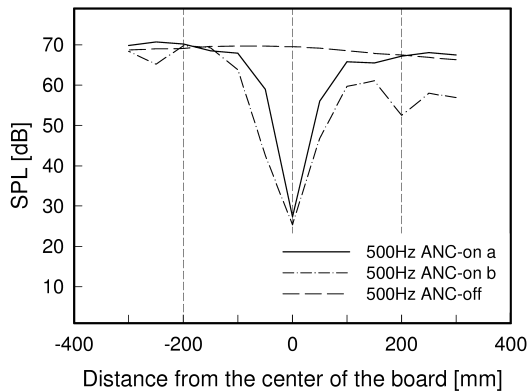


図-8 音圧レベル分布の変化 (500Hz)

で減少し、40dB以上の大きな消音効果が得られた。しかし、その他の点では音圧レベルの減少はあまり見られず、測定点の端部では制御前よりわずかながら悪化している箇所もある。

今回検討した周波数の中で最も二次音源の出力が大きかつ平坦であった500Hzの純音について、音圧レベル分布の変化を図-8に示す。図中のANC on aは圧電スピーカをアクリル板中央に設置した場合、ANC on bは圧電スピーカをモードを考慮した位置に設置した場合である。

圧電セラミックスピーカの設置位置の違いを見るために、中央に貼付した場合(図-7の500Hz a)とモードの腹の位置に貼付した場合(図-7の500Hz b)を比較する。モードを考慮しないと、制御位置からおよそ幅100mmの範囲で10dB以上の消音効果が得られ、モードを考慮することによって制御点からおよそ幅200mmの範囲で10dB以上の消音効果が得られる。しかし、モードを考慮した場合に消音効果の対称性が薄れた。圧電スピーカと測定点の位置関係は中心に対して線対称であることから、これは圧電セラミックスピーカの振動が均一にはアクリル板に伝わっていないことを示すと考えられる。今後、原因の検討を行いたい。

#### 4. まとめ

透光性樹脂と圧電セラミックスピーカを組み合わせで作成した二次音源が、LMSアルゴリズムを用いたアクティブ騒音制御技術によって125Hz～500Hzの周波数域で消音効果を有することを確認した。

125Hz～500Hzの周波数域においては、アクリル板の固有モードを考慮しなくても制御位置では40dB以上の消音効果があり、制御位置からおよそ幅100mmの範囲で10dB以上の消音効果が期待できる。また、固有モードを考慮することで二次音源の音圧レベル分布は平坦になり、騒音制御の有効範囲が広がり、500Hzではおよそ幅200mmの範囲で10dB以上の消音効果が得られることを確認した。二次音源の音圧レベル分布を平坦にすることで、より少ない圧電セラミックスピーカで開口部全体の騒音を制御できると考えられる。

#### 5. 今後の課題

本論文では、アクティブ騒音制御の効果として音圧レベル分布を1次元で捉えて評価した。建物開口部でのアクティブ騒音制御を実現するためには、さらに面的、立体的に消音効果の検討を行う必要があると考えている。二次音源が出力する周波数域についても、より低音域(例えば63Hz)に対応しなければ、道路交通騒音や航空機騒音を十分に遮ることはできない。より高出力の圧電セラミックスピーカを用いて再検討する必要があると考えている。

また、ANCの性能を支配する適応アルゴリズムに関しても、都市の変動騒音に対応した収束性能の高い安定したアルゴリズムへの改良が必要不可欠である。さらに、実際の建物開口部での騒音は平面的に入射していないと想像され、今後、現実の騒音問題の解決に寄与することができるよう、開口面への音波入射状況を正しく把握し、実用的な建物開口部でのアクティブ騒音制御システムの提案を目指す。

#### 参考文献

- 1) 西村正治, “アクティブ制御今昔-これまでと今後の展望-,” 音響学会誌 59 巻 7 号, pp.399-400, 2003 年 7 月.
- 2) 伊勢史郎, “境界音場制御の原理のアクティブ騒音制御への応用,” 音響学会誌 59 巻 7 号, pp.414-419, 2003 年 7 月.
- 3) Robert L. Clark and Chris R. Fuller, “Optimal placement of piezoelectric actuators and polyvinylidene fluoride error sensors in active structural acoustic control approaches,” J. Acoust. Soc. Am, pp.1521-1533, September 1992.
- 4) 仲島崇博, 伊勢史郎, “壁を透過する騒音に対するピエゾ素子を用いたアクティブ制御の実験的検討,” 日本音響学会講演論文集, pp.683-684, 2000 年 9 月.
- 5) Stephen J. Elliott et al., “A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration,” IEEE Trans. Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-35 No.10, pp.1423-1434, October 1987.
- 6) 宇佐川毅, “フィードフォワード型のアクティブ制御用アルゴリズム,” 音響学会誌 59 巻 7 号, pp.401-406, 2003 年 7 月.
- 7) 西岡隆, “構造振動解析,” 培風館, pp.137-160, 1987.