

IV-22

反響のある3次元音場の能動的騒音制御

北海道大学工学部

佐藤 新市

北海道大学工学部 正会員

長谷部正基

北海道大学工学部 正会員

金安 公造

1. はじめに

現在の都市内における騒音制御の主な手段は、遮音壁など音波の伝搬経路に物理的な障害物あるいは吸音材を挿入することにより、その伝搬を抑えるものが代表的である（受動的騒音制御）。しかしこの方法は都市景観を悪化させるばかりでなく、その大きさ、重量、コストの割には十分な消音効果が得られず、更に効果的な騒音の制御手法が期待されている。

そのような状況の中で、近年のデジタル信号処理技術等の進歩に触発されて、能動的騒音制御に関する研究が盛んになりつつある。能動的騒音制御とは、「音波の干渉を利用するものであって、ある周期性音波に対して、別の音源（二次音源）から同振幅、逆位相の音波を付加して、能動的に原音を減衰させる制御方法」のことである（図1参照）。この制御方法は、既に空調用ダクトなどの1次元音場においては実用化段階に達している。しかし3次元音場においては、自由音場ではかなりの消音効果が認められているものの、現実の道路周辺の音響条件、例えば舗装路面等の反響を起こす面がある場合には、十分な消音効果が得られていないのが現状であり¹⁾、道路交通騒音等の本質的に3次元音場である場合の制御への適用には至っていない。

本研究では、反響のある3次元音場の能動的騒音制御の理論に関し、従来の手法の欠点を複数の二次音源を用いることにより検討した。また、自由音場（無響室）での実験で、5 dB程度の消音効果を得た。

2. 従来の能動的騒音制御の手法

2-1 反響のある音場の特徴

反響がある場合には、音源から受信点に到達する

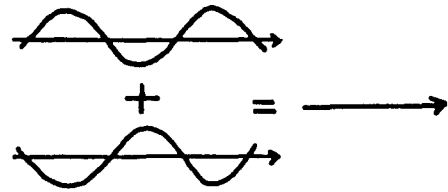


図1

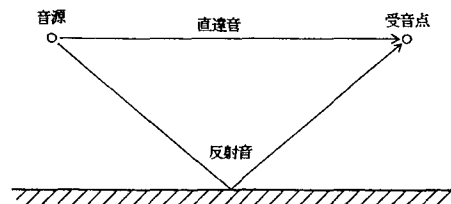


図2

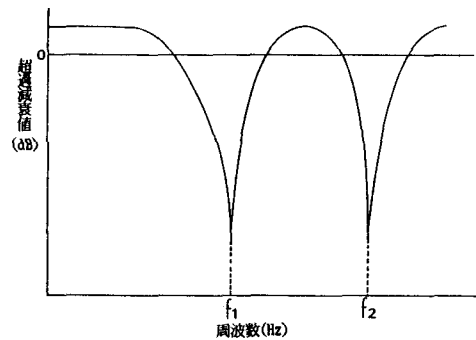


図3

音は、直達音と反射音がある（図2参照）。それらの干渉により、受信点での超過減衰値（ $= -20 \log$ （

反射面がある時の音圧／反射面がない時の音圧) は一般に図3のようになる。この図から解るように、ある周波数(図3では f_1, f_2)で深くぼみ(Dip)が生じ、受音点での波形は歪んだものとなり、このため従来の手法では良好な性能を得ることができない。

2-2 従来の逆フィルタ処理の欠点

能動的騒音制御の方法は、主音源からの音を参照用マイクロホンで受音し、その信号を「逆フィルタ」と呼ばれる位相を反転させるフィルタに通し、二次音源から放射することにより、消音動作をさせるものが一般的である(図4参照)。図5(図4の系をブロック線図で表示したもの)において、任意の x に対して $y=0$ となる条件は、

$$g_0(m) + g_1(m) \otimes h(i) = 0 \quad \dots(1)$$

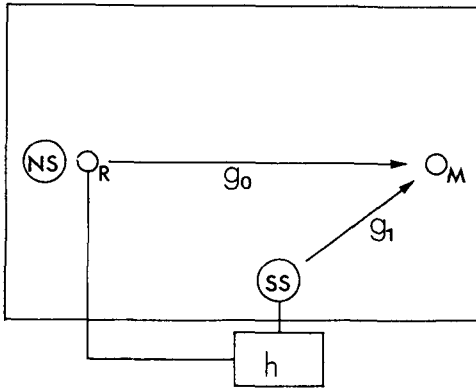


図4

NS:主音源;SS:二次音源;R:参照用マイクロホン(系の入力);M:消音目的点(系の出力); $g_0(m)$:NSとMとの間のインパルスレスポンス(次数 m); $g_1(m)$:SSとMとの間のインパルスレスポンス; $h(i)$:デジタルフィルタの係数(次数 i)

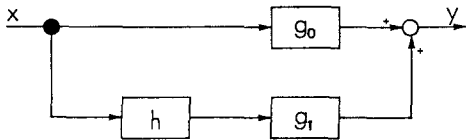


図5

x :系の入力; y :系の出力

である($\otimes$ は畳み込み演算を表す演算子である)。ここで、 $g_0(m)$ の係数列を G_0 、 $g_1(m)$ から作られる畳み込み行列を G_1 、 $h(i)$ の係数列を H とすると、式(1)は式(2)の様に、具体的に行列の形で書き表すことができる^{2),3)}。

$$G_0 + G_1 H = 0, \quad H = G_1^{-1} (-G_0) \quad \dots(2)$$

ここで、

$$G_0 = [g_0(0) \quad \dots \quad g_0(m) \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T$$

← ----- $m+i+1$ ----- →

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_1(0) & & & & \\ \vdots & g_1(0) & & & 0 \\ g_1(m) & \vdots & & & \\ & g_1(m) & & & \\ & & & g_1(0) & \\ 0 & & & \vdots & \\ & & & g_1(m) & \end{bmatrix}$$

← ----- $i+1$ ----- →

$m+i+1$

$$H = [h(0) \quad \dots \quad h(i)]^T$$

← ----- $i+1$ ----- →

である。 G_1 は、 $(m+i+1)$ 行 $(i+1)$ 列の行列であるが、 $(G_1$ の行数) $>$ $(G_1$ の列数)であるため、 G_1 は正方行列でなく逆行列が存在しない(フィルタの係数を算出する連立一次方程式が不能である)ので、フィルタの係数 $h(i)$ を直接求めることができない。そのために従来では、最小2乗法等を用いて近似解を求めていた。しかし、2-1節で示す様な反射音に加わり歪んだ波形に対しては誤差が大きくなり、能動的騒音制御を行う際に十分な消音が達成されなかった。

本研究ではこの点を改善するために、後述の多点逆フィルタ処理理論を用いて正確なフィルタの係数を求めることにした。

3. 多点逆フィルタ処理理論³⁾

この理論は室内音響系や電気回路等で、不安定な系に対し特別な信号伝達経路を加えることにより、系全体の安定性を保つことができるという考え方を応用したものである。

まず、図6に示す系を提案する(2個の二次音源を使用する)。図7(図6の系をブロック線図で表示したもの)において、任意の x に対して $y=0$ となる条件は、

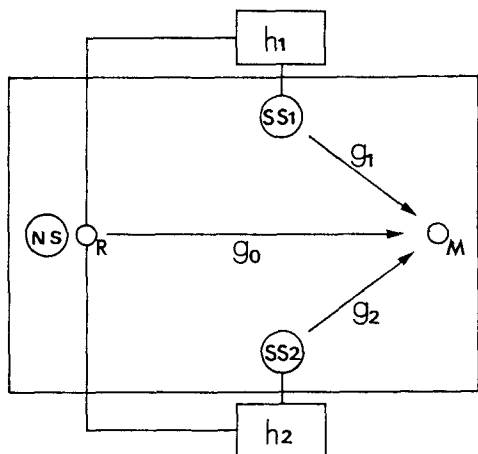


図6

NS:主音源;SS₁,SS₂:二次音源;R:参照用マイクロホン(系の入力);M:消音目的点(系の出力); $g_0(m)$:NSとMとの間のインパルスレスポンス(次数 m); $g_1(m)$:SS₁とMとの間のインパルスレスポンス; $g_2(m)$:SS₂とMとの間のインパルスレスポンス; h_1, h_2 :デジタルフィルタの係数(次数 i)

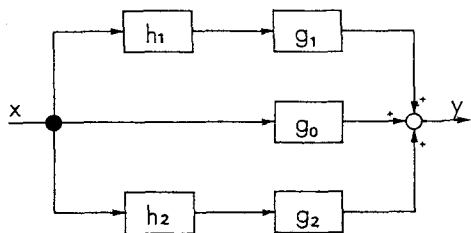


図7

x :系の入力; y :系の出力

$$g_0(m) + g_1(m) \otimes h_1(i) + g_2(m) \otimes h_2(i) = 0 \quad \dots(3)$$

である。ここで、 $g_0(m)$ の係数列を G_0 、 $g_1(m)$ 、 $g_2(m)$ から作られる畳み込み行列を G_1, G_2 、 $h_1(i), h_2(i)$ の係数列を H_1, H_2 とすると、式(3)は式(4)の様に、具体的に行列の形で書き表すことができる。

$$G_0 + G_1 H_1 + G_2 H_2 = G_0 + [G_1 \ G_2] [H_1^T \ H_2^T]^T = 0 \quad \dots(4)$$

式(4)において、 $G_{12} = [G_1 \ G_2]$ 、 $H_{12} = [H_1^T \ H_2^T]^T$ とくと、式(4)は式(5)の様に書き換えることができる。

$$G_0 + G_{12} H_{12} = 0, \quad H_{12} = G_{12}^{-1} (-G_0) \quad \dots(5)$$

G_0 : $(m+1)$ 行1列の列ベクトル

G_{12} : $(m+1)$ 行 $(2 \times (i+1))$ 列の行列

H_{12} : $(2 \times (i+1))$ 行1列の列ベクトル

ここで行列 G_{12} は、 g_1, g_2 の次数を $m=i+1$ と調節することにより正方行列となり、かつ正則行列である場合に G_{12}^{-1} が存在し、同時に H_{12} の存在も保証される。尚この条件は、SS₁, SS₂の幾何学的配置を調整することにより、満足することができる。

故に2個の二次音源を用いて、上述の方法を用いることにより、正確なフィルタの係数を算出することが可能となる。

4. 実験

4-1 実験装置

本研究で用いた理論の妥当性を確認するために、自由音場(無響室)で実験を行った。尚、実際にフィルタ処理を実現させるためには、非常に高速の演算器が必要となる。本研究では、TMS320C25, DSP1025というデジタルシグナルプロセッサを使用することにした。そのハードウェア、ソフトウェア環境を図8に示す。尚、A/D変換器のサンプリング周波数は

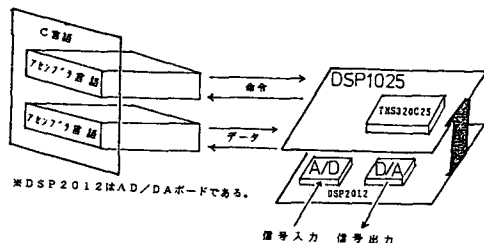


図8

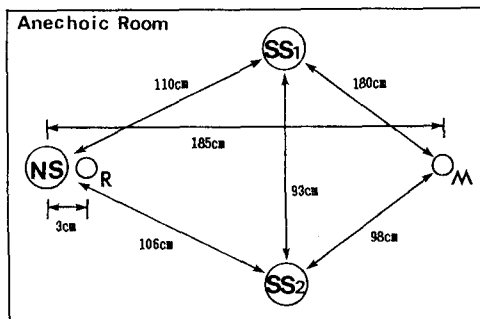


図9

※記号は図6と同じ

6.4kHzとした。また、無響室内での実験の際の幾何学的配置を図9に示す。

各々の経路のインパルスレスポンスは、系の入出力間の伝達関数をクロススペクトル法によって求め、それを逆フーリエ変換して求めた⁴⁾。また、行列 G_{12} の次数は、逆行列を計算するコンピュータの性能上の制約より128（デジタルフィルタ h_1, h_2 の次数は共に64）とした。

4-2 実験結果

主音源の信号として、400～600Hzのランダムノイズを用いた。

フィルタ処理前とフィルタ処理後のパワースペクトルを図10に示す。この図から、フィルタ処理後に5dB程度の消音効果が得られたことがわかる。

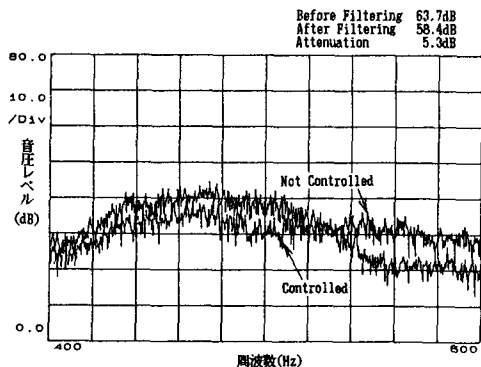


図10

5. まとめと今後の課題

本研究では、反響のある3次元音場の能動的騒音制御に関し、従来の手法の欠点を複数の二次音源を用いることにより検討した。また、自由音場（無響室）での実験では、5dB程度の消音効果を得た。

今後の課題としては、より正確なインパルスレスポンスの測定法（システム同定）の検討、フィルタの係数を算出する際の逆行列の計算法の検討（高速化、高次数化）等が挙げられる。

【参考文献】

- 1) 金田豊：“知的マイクロホンシステム—マイクロホンの指向性制御技術と最近の音響システム研究の課題—”、計測と制御28巻(1989)53-58

- 2) 浜田晴夫：“デジタルフィルタの応用入門”、日本音響学会誌43巻(1987)267-276

- 3) M. Miyosi and Y. Kaneda: Inverse Filtering of Room Acoustics, IEEE Trans. ASSP-36(2), (1988) 145-152

- 4) 木戸健一：“デジタルフィルタの原理”、日本音響学会誌43巻(1987)538-543