

ダクト両端部の同時アクティブ消音 Simultaneous Active Noise Control at Both Ends of a Duct

神谷恵輔[†], 金井孝治^{††}
Keisuke Kamiya[†], Koji Kanai^{††}

Abstract This paper presents a method for simultaneous active noise control of both ends of a duct. So far many papers on active noise control have been published. Most of them, however, treat the problem of noise reduction in one side of the duct. This paper discusses a method for simultaneous active noise control of both ends of a duct using single microphone placed near to the noise source and two sets of control speakers placed near to the both ends of the duct. First, based on the expression of the sound in the duct obtained as a sum of sound waves propagated from the noise source, control speakers and reflections from the ends, a control law for noise cancelation at the both ends is derived. Then, the control law is approximated to implement real time control in the form of the IIR digital filter. Finally, experiment is conducted to confirm the validity of the presented active noise control method.

1. 緒言

近年、住宅街に情報通信機器などが密集して設置されるようになり、これらの機器から発せられる騒音が大きな問題となっている。本研究ではこのような騒音を低減するための基礎的な取り組みとして、ダクトを取り上げ、ダクト両端部から発せられる騒音を低減するための方法について検討を行う。騒音を低減するための方法として吸音材などを用いるパッシブなもの、マイクおよび制御用スピーカーを用いるアクティブなものがある。ここでは大きな消音効果の期待できるアクティブ消音を採用する。ダクトを対象としたアクティブ消音については以前から多くの研究が行われており、現在でも報告がいくつか見られる⁽¹⁾⁽⁷⁾。ただしそのほとんどはダクトの片側から発せられる音の低減を狙ったものである。また制御方法も FIR 型デジタルフィルタを用いた適応制御が多く用いられている。本研究ではダクト内部の騒音源の近くにおかれた 1 本のマイクで音を計測し、その結果に基づいてダクトの両端部を同時に消音する方法について検討する。まず、制御則について理論的な検討を行い、実験によりその有効性を確認する。

2. 制御対象のモデル化と制御則の導出

2.1 制御対象のモデル化

図 1 に示すダクトを考える。このダクト内部には騒音源が置かれているとする。騒音源の左右に制御用スピーカーを 2 つ配置し、制御用スピーカーと騒音源の間にマイクを 1 つ配置する。マイクで測定した音を基に、左右の制御用スピーカーよりダクトの端部寄りの領域で騒音を消すことを考える。以下、制御則を導くための準備として制御用スピーカーを含めた系のモデル化を行う。なお、ダクトの左右の端の音響インピーダンスはそれぞれ z_L 、 z_R であるとする。

図 2 に示すように騒音源の位置を原点に取って x 軸を定める。ダクトの長さを l とし、ダクトの左端から騒音源までの距離を l_0 とする。なお図 2 では騒音源をスピーカーで示している。騒音源から左右の制御用スピーカーまでの距離をそ

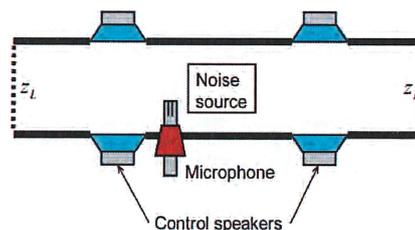


図 1 制御対象

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††} 日東工業株式会社 (長久手市)

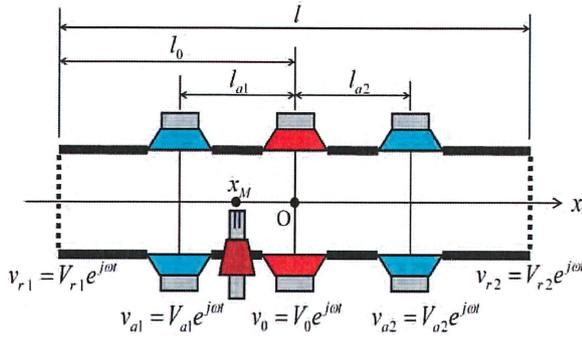


図2 座標系と音源

それぞれ l_{a1} 、 l_{a2} とする。またマイクの位置を x_M とする。以下では $-l_{a1} < x_M < 0$ の場合を考えるが $0 < x_M < -l_{a2}$ の場合も同様である。騒音源からは角周波数 ω の音が発せられているとし、その粒子速度を $v_0 = V_0 e^{j\omega t}$ とおく。これに対応して制御用スピーカー1、2から発せられる音の粒子速度をそれぞれ $v_{a1} = V_{a1} e^{j\omega t}$ 、 $v_{a2} = V_{a2} e^{j\omega t}$ とする。さらにダクトの左右両端における反射波の粒子速度をそれぞれ $v_{r1} = V_{r1} e^{j\omega t}$ 、 $v_{r2} = V_{r2} e^{j\omega t}$ とする。

騒音源から左右に放射される音波に対する速度ポテンシャルをそれぞれ φ_0^- 、 φ_0^+ と表せば、これらは

$$\begin{aligned}\varphi_0^+ &= -\frac{j}{k'} V_0 e^{j(\omega t - k'x)} \\ \varphi_0^- &= -\frac{j}{k'} V_0 e^{j(\omega t + k'x)}\end{aligned}\quad (1)$$

と書ける。ここで k' は c を音速、 d を空気の粘性減衰係数として $k' = (\omega - jd)/c$ で与えられる量である。同様に制御用スピーカー1、2から左右に放射される音波に対する速度ポテンシャルをそれぞれ φ_{a1}^- 、 φ_{a1}^+ 、 φ_{a2}^- 、 φ_{a2}^+ と表せば、これらは

$$\begin{aligned}\varphi_{a1}^+ &= -\frac{j}{k'} V_{a1} e^{j(\omega t - k'(x+l_{a1}))} \\ \varphi_{a1}^- &= -\frac{j}{k'} V_{a1} e^{j(\omega t + k'(x+l_{a1}))} \\ \varphi_{a2}^+ &= -\frac{j}{k'} V_{a2} e^{j(\omega t - k'(x-l_{a2}))} \\ \varphi_{a2}^- &= -\frac{j}{k'} V_{a2} e^{j(\omega t + k'(x-l_{a2}))}\end{aligned}\quad (2)$$

と書ける。さらに管路の左右両端からの反射波に対する速度ポテンシャルをそれぞれ φ_{r1} 、 φ_{r2} と表せば、これらは

$$\begin{aligned}\varphi_{r1} &= -\frac{j}{k'} V_{r1} e^{j(\omega t - k'(x+l_0))} \\ \varphi_{r2} &= -\frac{j}{k'} V_{r2} e^{j(\omega t + k'(x-l-l_0))}\end{aligned}\quad (3)$$

と書ける。以上の量を用いれば、管路内の速度ポテンシャル φ は領域 $-l_0 \leq x < -l_{a1}$ 、 $-l_{a1} < x < 0$ 、 $0 < x < l_{a2}$ 、 $l_{a2} < x \leq l-l_0$ においてそれぞれ

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0^- + \varphi_{a1}^- + \varphi_{a2}^- + \varphi_{r1} + \varphi_{r2} \\ &= -\frac{j}{k'} [V_0 e^{jk'x} + V_{a1} e^{jk'(x+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{jk'(x-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'(x+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{jk'(x-l+l_0)}] e^{j\omega t} \quad (-l_0 \leq x < -l_{a1})\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0^- + \varphi_{a1}^+ + \varphi_{a2}^- + \varphi_{r1} + \varphi_{r2} \\ &= -\frac{j}{k'} [V_0 e^{jk'x} + V_{a1} e^{-jk'(x+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{jk'(x-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'(x+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{jk'(x-l+l_0)}] e^{j\omega t} \quad (-l_{a1} < x < 0)\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0^+ + \varphi_{a1}^+ + \varphi_{a2}^- + \varphi_{r1} + \varphi_{r2} \\ &= -\frac{j}{k'} [V_0 e^{-jk'x} + V_{a1} e^{-jk'(x+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{jk'(x-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'(x+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{jk'(x-l+l_0)}] e^{j\omega t} \quad (0 < x < l_{a2})\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0^+ + \varphi_{a1}^+ + \varphi_{a2}^- + \varphi_{r1} + \varphi_{r2} \\ &= -\frac{j}{k'} [V_0 e^{-jk'x} + V_{a1} e^{-jk'(x+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{-jk'(x-l_{a2})} + V_{r1} e^{jk'(x+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{jk'(x-l+l_0)}] e^{j\omega t} \quad (l_{a2} < x \leq l-l_0)\end{aligned}\quad (7)$$

と書ける。

次にマイクで測定される音について考える。測定された音圧を p_M とすれば

$$p_M = P_M e^{j\omega t}\quad (8)$$

と表される。一方、位置 x_M における速度ポテンシャルは式(5)より

$$\begin{aligned}\varphi_M &= -\frac{j}{k'} [V_0 e^{jk'x_M} + V_{a1} e^{-jk'(x_M+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{jk'(x_M-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'(x_M+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{-jk'(x_M-l+l_0)}] e^{j\omega t}\end{aligned}\quad (9)$$

と書ける。速度ポテンシャルと音圧の関係をいれれば、式(8)、(9)より

$$\begin{aligned}P_M &= \rho c [V_0 e^{jk'x_M} + V_{a1} e^{-jk'(x_M+l_{a1})} \\ &\quad + V_{a2} e^{jk'(x_M-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'(x_M+l_0)} \\ &\quad + V_{r2} e^{-jk'(x_M-l+l_0)}]\end{aligned}\quad (10)$$

を得る。

次に境界条件について考える。前述のように、ダクトの左右端すなわち $x = -l_0$ 、 $x = l-l_0$ における音響インピーダンスを z_L 、 z_R としている。これを式で表せば

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + d\varphi \right) &= z_L \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (x = -l_0) \\ \rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + d\varphi \right) &= -z_R \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (x = l-l_0)\end{aligned}\quad (11)$$

となる。この境界条件に式(4)、(7)を代入し、整理すると

$$\begin{aligned} & V_0 e^{-jk'l_0} + V_{a1} e^{-jk'(l_0-l_{a1})} + V_{a2} e^{-jk'(l_0+l_{a2})} + V_{r1} \\ & + V_{r2} e^{-jk'l} \\ & = \frac{z_L}{\rho c} (V_0 e^{-jk'l_0} + V_{a1} e^{-jk'(l_0-l_{a1})} + V_{a2} e^{-jk'(l_0+l_{a2})} \\ & - V_{r1} + V_{r2} e^{-jk'l}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & V_0 e^{-jk'(l-l_0)} + V_{a1} e^{-jk'(l-l_0+l_{a1})} + V_{a2} e^{-jk'(l-l_0-l_{a2})} \\ & + V_{r1} e^{-jk'l} + V_{r2} \\ & = \frac{z_L}{\rho c} (V_0 e^{-jk'(l-l_0)} + V_{a1} e^{-jk'(l-l_0+l_{a1})} \\ & + V_{a2} e^{-jk'(l-l_0-l_{a2})} + V_{r1} e^{-jk'l} - V_{r2}) \end{aligned}$$

を得る。

以上の準備のもとに V_{r1} 、 V_{r2} 、 V_0 を、 P_M 、 V_{a1} 、 V_{a2} を用いて表すことを考える。表記の簡単のため $A = e^{jk'l}$ 、 $B = e^{jk'l_0}$ 、 $C = e^{jk'l_{a1}}$ 、 $D = e^{jk'l_{a2}}$ 、 $X_M = e^{jk'x_M}$ なる量を導入する。式(10)を V_0 について解けば

$$\begin{aligned} V_0 = & \frac{1}{\rho c} X_M^{-1} P_M - [X_M^{-2} C^{-1} \quad D^{-1}] \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} \\ & - [X_M^{-2} B^{-1} \quad A^{-1} B] \begin{Bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

を得る。また、式(12)を行列の形で表せば

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 + z_L/\rho c & (1 - z_L/\rho c)A^{-1} \\ (1 - z_R/\rho c)A^{-1} & 1 + z_R/\rho c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} (1 - z_L/\rho c)B^{-1} & 0 \\ 0 & (1 - z_R/\rho c)A^{-1}B \end{bmatrix} \\ & \times \left(\begin{bmatrix} C & D^{-1} \\ C^{-1} & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} V_0 \right) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

を得る。上式の V_0 に式(13)を代入すれば

$$\begin{aligned} [U] \begin{Bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (1 - z_L/\rho c)B^{-1} & 0 \\ 0 & (1 - z_R/\rho c)A^{-1}B \end{bmatrix} \\ \times \left(\begin{bmatrix} C - X_M^{-2}C^{-1} & 0 \\ C^{-1} - X_M^{-2}C^{-1} & D - D^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \frac{X_M^{-1}}{\rho c} P_M \right) \\ = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

を得る。ここで $[U]$ は2行2列の行列である。具体的な表現はここでは省略する。式(15)を V_{r1} 、 V_{r2} について解けば

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{Bmatrix} \\ & = [V] \left(\begin{bmatrix} C - X_M^{-2}C^{-1} & 0 \\ C^{-1} - X_M^{-2}C^{-1} & D - D^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} \right. \\ & \left. + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \frac{X_M^{-1}}{\rho c} P_M \right) \end{aligned} \quad (16)$$

を得る。ここで

$$[V] = -[U]^{-1} \begin{bmatrix} (1 - z_L/\rho c)B^{-1} & 0 \\ 0 & (1 - z_R/\rho c)A^{-1}B \end{bmatrix} \quad (17)$$

である。

2.2 制御則の導出

制御則の導出について考える。いま考えている問題は領域 $-l_0 \leq x < -l_{a1}$ および $l_{a2} < x \leq l - l_0$ において音圧を0とすることであるが、ここではそれぞれの領域中の1点で音圧を0とすることを考える。 x_1 を領域 $-l_0 \leq x < -l_{a1}$ 内の点、 x_2 を領域 $l_{a2} < x \leq l - l_0$ 内の点とし、それぞれの点における速度ポテンシャルは式(4)および(7)において $x = x_1$ および $x = x_2$ で与えられることを考慮すれば、いま考えている条件は

$$\begin{aligned} & V_0 e^{jk'x_1} + V_{a1} e^{jk'(x_1+l_{a1})} + V_{a2} e^{jk'(x_1-l_{a2})} \\ & + V_{r1} e^{-jk'(x_1+l_0)} + V_{r2} e^{jk'(x_1-l+l_0)} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & V_0 e^{-jk'x_2} + V_{a1} e^{-jk'(x_2+l_{a1})} + V_{a2} e^{-jk'(x_2-l_{a2})} \\ & + V_{r1} e^{-jk'(x_2+l_0)} + V_{r2} e^{jk'(x_2-l+l_0)} = 0 \end{aligned}$$

と書ける。上式を整理すれば

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2^{-1} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} V_0 + \begin{bmatrix} C & D^{-1} \\ C^{-1} & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} \right) \\ & + \begin{bmatrix} X_1^{-1}B^{-1} & X_1A^{-1}B \\ X_2^{-1}B^{-1} & X_2A^{-1}B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

となる。ここで $X_1 = e^{jk'x_1}$ 、 $X_2 = e^{jk'x_2}$ である。上式に式(13)および(16)を代入し、整理すれば最終的に

$$\begin{aligned} [Z] \left(\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \frac{X_M^{-1}}{\rho c} P_M + \begin{bmatrix} C - X_M^{-2}C^{-1} & 0 \\ C^{-1} - X_M^{-2}C^{-1} & D - D^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} \right) \\ = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

の形の式を得る。ここで $[Z]$ は2行2列の行列である。具体的な表現はここでは省略する。式(20)より V_{a1} 、 V_{a2} を求めれば

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} C - X_M^{-2}C^{-1} & 0 \\ C^{-1} - X_M^{-2}C^{-1} & D - D^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \frac{X_M^{-1}}{\rho c} P_M \\ & = \frac{-1}{(X_M C - X_M^{-1} C^{-1})(D - D^{-1})} \begin{bmatrix} D - D^{-1} \\ C - C^{-1} \end{bmatrix} \frac{1}{\rho c} P_M \\ & = \frac{-1}{2\rho c E} \begin{bmatrix} \cos kl_{a1} \sinh \sigma l_{a1} + j \sin kl_{a1} \cosh \sigma l_{a1} \\ \cos kl_{a2} \sinh \sigma l_{a2} + j \sin kl_{a2} \cosh \sigma l_{a2} \end{bmatrix} P_M \end{aligned} \quad (21)$$

を得る。ここで

$$\begin{aligned} E = & \cos k(l_{a1} + x_M) \sinh \sigma(l_{a1} + x_M) \\ & + j \sin k(l_{a1} + x_M) \cos h \sigma(l_{a1} + x_M) \end{aligned} \quad (22)$$

である。式(21)を満たすように制御用スピーカを制御すれば、 x_1 および x_2 の位置において音圧を0とできる。さらに式(21)の条件を満たすとき、式(20)は x_1 、 x_2 に無関係に成り立つことが分かる。これはすなわち式(21)の条件を満たすとき、領域 $-l_0 \leq x < -l_{a1}$ および $l_{a2} < x \leq l - l_0$ 内では音圧が常に0となることを意味している。さらに加えて、式(21)には管路の境界部の音響インピーダンスは現れていない。

これは管路の境界条件とは無関係に静音化が可能であることを意味している。

2.3 デジタルフィルタによる実時間制御

式(21)の制御則に従って、実時間で制御することを考える。ここではデジタルフィルタを用いて実時間で制御を行うものとする。式(21)の右辺の P_M の係数すなわち

$$G_{a1}(\omega) = \frac{-1}{2\rho c E}$$

$$G_{a2}(\omega) = \frac{-1 \cos kl_{a1} \sinh \sigma l_{a1} + j \sin kl_{a1} \cosh \sigma l_{a1}}{2\rho c E \cos kl_{a2} \sinh \sigma l_{a2} + j \sin kl_{a2} \cosh \sigma l_{a2}} \quad (23)$$

は2つの制御用スピーカーに対する所望の制御器の周波数応答関数を表したものである。したがって周波数応答関数がこれと一致するようなデジタルフィルタを構成すればよい。しかしながら式(23)からわかるように、この周波数応答関数は三角関数や双曲線関数を含んだものとなっており、そのまま用いることはできない。そこで式(23)をデジタルフィルタで実現可能な形で近似する。具体的な近似式は消音対象の寸法や周波数範囲に依存するのでここでは省略する。

実際の制御においては制御用スピーカーの特性も考慮してデジタルフィルタを設計する。左右の制御用スピーカーの周波数応答関数をそれぞれ $G_{s1}(\omega)$ 、 $G_{s2}(\omega)$ とすれば、マイクで測定された音圧に対する制御用スピーカーの入力信号の周波数伝達関数は

$$G_1(\omega) = \frac{1}{G_{s1}(\omega)} G'_{a1}(\omega)$$

$$G_2(\omega) = \frac{1}{G_{s2}(\omega)} G'_{a2}(\omega) \quad (24)$$

となる。ここで $G'_{a1}(\omega)$ 、 $G'_{a2}(\omega)$ は式(23)の $G_{a1}(\omega)$ 、 $G_{a2}(\omega)$ をデジタルフィルタで実現可能な形に近似したものである。制御用スピーカーの周波数応答関数 $G_{s1}(\omega)$ 、 $G_{s2}(\omega)$ は実験等により求め、適当な式により近似する。

実際の制御は、周波数応答関数が式(24)と一致するような IIR 型デジタルフィルタを設計することにより行う。これは例えばインパルス不変法により可能である⁽⁸⁾。

3. 実験

2章で示した制御理論の有効性を検討するため、実験を行った。このとき必要となる制御用スピーカーの特性は別途実験を行うことにより定めた。

3.1 実験装置

実験には角型のアクリル製ダクトを用いた。この写真を図3に示し、実験装置全体の模式図を図4に示す。騒音源

としてダクトの中央に二つのスピーカーを向かい合う形で配置した。以下では、このスピーカーを騒音スピーカーと呼ぶ。また騒音スピーカーから左右に 0.25m 離れた位置に制御用のスピーカーを向かい合う形で配置した。騒音スピーカーにはデスクトップパソコンから 100[Hz]~1000[Hz]の周波数成分を含むノイズを発生させ、騒音信号として入力する。音を計測するマイクは騒音スピーカーから0.15[m]離れた位置に配置した。このマイクからの信号を、アンプおよび A/D 変換器を介して制御用コンピュータとして用いたノートパソコンに入力する。ノートパソコンでは式(24)に基づいて設計した IIR デジタルフィルタに従って制御用信号を算出し、これを D/A 変換器およびアンプを通して制御用スピーカーに入力する。ダクト両端部の音圧はマイクで測定する。

3.2 実験結果

両端部付近のマイクで測定したデータの 1/3 オクターブ分析結果を図 5(a)、(b)に示す。図には消音前と消音後の結果を示してある。図の縦軸は騒音レベルである。消音前と比較し消音後は両端部ともに騒音レベルが低くなっている。

これより本論文で示した方法によりダクト両端部の騒音を同時に低減できることが分かる。また図 5 より、周波数帯域によって大きな低減効果が得られる領域とそうでない領域があることが分かる。今回の実験では大きなところで 14[dB]の消音の効果があつた。低減効果が小さな領域は 250[Hz]から 400[Hz]の周波数帯域であった。この理由として、この周波数帯域で実験に用いたスピーカー特性の近似が不十分であったことがあげられる。スピーカー特性をも

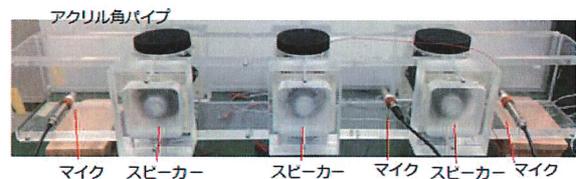
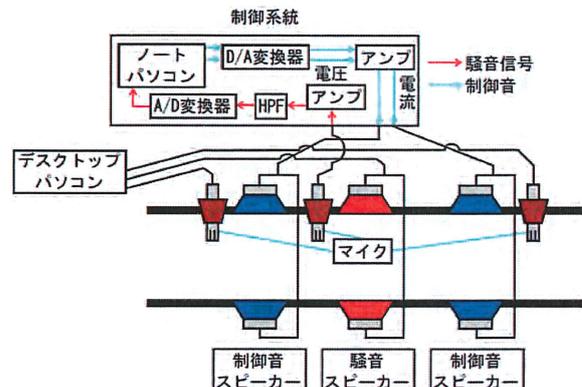


図3 実験に用いたダクト



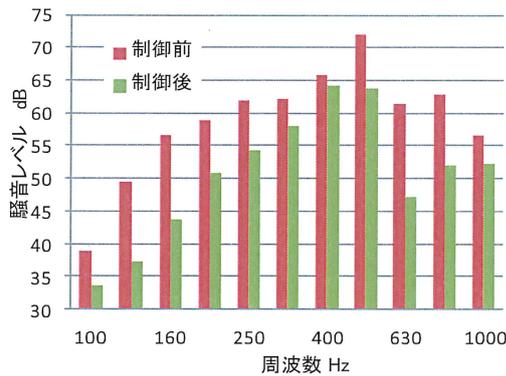
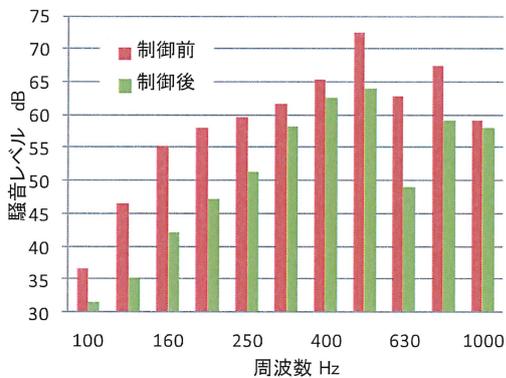


図4 実験装置

(a) ダクト左端における制御結果



(b) ダクト右端における制御結果

図5 実験結果

っとよく近似できる式が見つかれば、もっと良好な消音結果が得られる可能性がある。ただし、今回は制御系の安定性を保ったままさらに良好に近似できる式が見当たらなかった。制御に用いるスピーカーとして、もっと扱いやすい特性をもつものを選定することも重要な要因の一つであると思われる。

なお、理論的には2.2節で述べたように境界条件によらず静音化が可能であるということであったが、実際には境界条件を変化させると発振し、制御が不可能となる場合があった。この原因については不明であるが、上記と同様スピーカー特性の近似およびモデル化誤差の影響が考えられる。

5. 結言

本研究ではダクト内部の騒音源の近くにおかれた1本の

マイクで音を計測し、その結果に基づいてダクトの両端部を同時に消音する方法について検討した。まず、ダクト内の音の表現から始めて、ダクト両端部をアクティブ消音するための制御則を導いた。またこれをデジタルフィルタで実現可能な形で近似し、実時間制御が可能となるようにした。最後に実験を行い、本論文で示した方法の有効性を検討した。その結果、本論文の方法でダクト両端部のアクティブ消音が可能であることを示した。ただし、今回の実験装置では周波数帯域により低減効果に差があることがわかった。また境界条件に関しては理論と異なる結果となった。これらについては今後の検討課題としたい。

謝辞

本研究は2011年度および2012年度にわたって愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究(A)の支援を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) M. A. Swinbanks, "The active control of sound propagation in long ducts", *J. Sound Vibr.*, vol. 27, pp. 411–436, 1973.
- (2) M. L. Munjal and L. J. Eriksson, "Analysis of a linear one-dimensional active noise control system by means of block diagrams and transfer functions", *J. Sound Vibr.*, vol. 129, no. 3, pp. 443–455, 1989.
- (3) C. H. Hansen and S. D. Snyder, "Active Control of Noise and Vibration", CRC Press, 1991.
- (4) S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: A tutorial review", *Proc. IEEE*, vol. 87, no. 6, pp. 943–975, 1999.
- (5) E. Esmailzadeh, A. Alasty, and A. R. Ohadi, "Multi-channel adaptive feedforward control of noise in an acoustic duct", *ASME J. Dyn. Syst. Meas., Control*, vol. 126, no. 2, pp. 406–416, 2004.
- (6) A. Carini and S. Malatini, "Optimal variable step-size NLMS algorithms with auxiliary noise power scheduling for feedforward active noise control", *IEEE Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol. 16, no. 8, pp. 1383–1395, 2008.
- (7) J. Hu and T. Hsiao, "Adaptive Feedforward Active Noise Cancellation in Ducts Using the Model Matching of Wave Propagation Dynamics", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 20, no. 5, pp. 1351–1356, 2012.
- (8) 三谷政昭, "デジタルフィルタデザイン", 昭晃堂, 1993.