

(19) 空調用ダクト騒音のアクティブ消音

ACTIVE NOISE CONTROL FOR AIR-CONDITIONING DUCT

樋江井武彦*、伊藤宏幸*、康倫明*

Takehiko HIEI, Hiroyuki ITOH, Yoon-Myung KANG

This paper describes an experimental investigation of an active noise control for an air-conditioning duct. An experimental system using the controller based on least mean square (LMS) algorithm is described. The measurements in a laboratory duct show that the random noise can be attenuated by 10 to 20 dB from 100 up to 1200 Hz. The measurements in an air-conditioning duct are also demonstrated. It is possible to achieve attenuation of 10 to 20 dB from 150 Hz up to the first cross-mode. However, performance diminishes when the chamber and the grill are connected to the end of the duct.

key words : active noise control, anti-phase, FIR filter, adaptive filter, LMS algorithm

1. まえがき

騒音に対して、同振幅で180度位相の異なる音波を付加することにより、能動的に騒音を低減するアクティブ消音の歴史は古く、その基本的な考え方はP. Luegによって50年以上前に提唱されている¹⁾。しかし、当時のアナログ技術では十分な速度と精度で振幅や位相を制御するのが困難であった。1970年代後半からのデジタル信号処理技術の進歩は、このような問題点を解決し、実用的な特性が得られるようになってきた。なかでも、ダクト騒音の消音は、騒音の波長が断面寸法に比べて十分に大きい場合、1次元の平面進行波とみなすことが可能で、消音システムの構成も簡単にできることから、最も研究が進んでおり、一部実用化段階に入っている。吸音あるいは共鳴型の従来のパッシブ型消音と比較して、アクティブ消音は、低周波数領域で消音量が大きい、圧力損失が小さい、気流による2次騒音が発生しないといった利点を有している。

本報告では、まずアクティブ消音の原理、ダクト消音システムについて簡単に述べる。次にダクト音響特性測定結果を用いてコントローラ特性を決定する固定型FIRフィルタと、適応型FIRフィルタの2通りの手法を用いて、ランダム音を消音した結果について述べる。最後に実際に空調用ダクトに適用した結果について報告する。

* ダイキン工業株式会社 機械技術研究所

2. アクティブ消音の基本原理

騒音が定常な単一正弦波の場合、音波は空気の疎密波であることから、同振幅、逆位相の付加音との重ね合せの結果、相殺され理想的には、音圧は0となる。図1は振幅と位相のミスマッチによる消音量の限界を示したものである²⁾。20 [dB] 以上の消音量を得る場合、位相のミスマッチは5°以内、振幅のミスマッチは0.9 [dB] 以内に抑える必要があることがわかる。

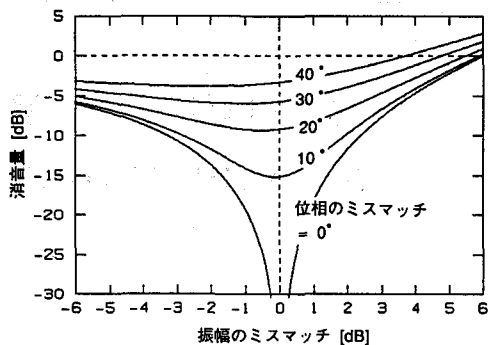


図1 音波干渉による消音量

3. ダクト消音

3. 1 ダクトの固有周波数

ダクトの固有周波数は断面寸法で決まり、第1のクロスモードの周波数までは平面波近似が成立し、1次元の取り扱いができる。この周波数以上ではモードを考慮する必要があるためアクティブ消音は一般に困難となる。

図2に内壁が完全反射面としたときの正方形ダクトと円形ダクトの断面積と第1のクロスモード周波数の関係を示す³⁾。

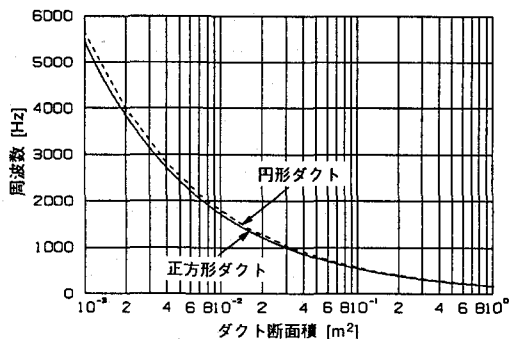


図2 ダクトの第1クロスモード周波数

3. 2 システムのモデル化

図3においてモニタマイクロフォン点の音圧を0にする ($M=0$) ことを考える。コントローラの伝達関数を T_a 、 $A \rightarrow B$ の伝達関数を T_{BA} と表すことにすると、次の関係式が導かれる⁴⁾。

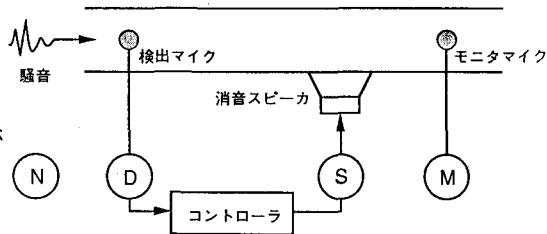


図3 システムのモデル化

$$\begin{cases} S = T_a \cdot D \\ D = T_{DN} \cdot N + T_{DS} \cdot S \\ M = T_{MN} \cdot N + T_{MS} \cdot S \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで、 N : 騒音信号 D : コントローラ入力 (検出マイクロフォン出力)
 S : コントローラ出力 M : モニタマイクロフォン出力

$M=0$ より、

$$T_a = T_{MN} / (T_{DS} \cdot T_{MN} - T_{MS} \cdot T_{DN}) \quad (3.2)$$

(3.2) 式の伝達特性を実現することにより、モニタマイクロフォン点における消音が可能となる。システムの安定性については $-T_{DS} \cdot T_a$ がナイキストの安定条件を満たせばよい。そのためには消音用スピーカから検出マイクロフォンまでの伝達関数である T_{DS} (音響フィードバック) を極力小さくする必要がある。

今回の実験では安定性を最優先し、コントローラには有限のインパルス応答を有する F I R (Finite

Impulse Response) フィルタを用いた。フィルタ入出力関係は次式で表現される。

$$y(n) = \sum_{m=0}^M h(m)x(n-m)$$

(3.3)

ここで、 $x(n)$: 入力 $y(n)$: 出力 $h(m)$: フィルタ係数

3.3 適応フィルタ ^{5, 6)}

マイクロフォンまたはスピーカの特性変化、温度や流速変化等によってシステム特性が経時変化するような場合、これらの変化に追従し、常に最良の消音効果が得られるように特性を変化させることが望ましい。適応フィルタでは図4に示すように、出力 $y(n)$ と理想出力 $d(n)$ とを比較しながらその誤差信号 $e(n)$ を用いて係数の修正を行い、 $e(n)$ のパワーを最小化する。消音の場合、 $d(n)$ は消音 OFF 時の騒音を、 $e(n)$ はモニタマイクロフォン出力信号となる。以下に今回実験で用いた最小2乗平均 (Least Mean Square, LMS) アルゴリズムについて説明する。

LMSアルゴリズムでは入力ベクトル $x(n)$ と誤差信号 $e(n)$ のサンプル値により、 $e(n)$ の2乗平均誤差のフィルタ係数 $h(n)$ に関する1次導関数に瞬時推定値を用いて、フィルタ係数ベクトルを次のように変化させる。(μ : ステップサイズパラメータ)

$$h(n+1) = h(n) + \mu e(n)x(n)$$

$$0 < \mu < (2 / \text{入力信号のパワー})$$

(3.4)

4. 消音実験

4.1 基本性能実験

(3.2) 式から最小2乗法により算出されるフィルタ係数を用いた固定型FIRフィルタおよびLMSアルゴリズムを用いた適応型FIRフィルタによる消音実験を行なった。ダクトは直径 50 [mm] のアクリル管で、騒音源はスピーカである。実験ブロック図を図5に示す。音響フィードバックゲインを小さくするため、2本の検出マイクロフォンを用いて指向性をもたせている。

固定型FIRフィルタの場合、予め(3.2) 式で与えられるフィルタの係数を求めておく必要がある。ここでは、(3.2) 式を時間領域に変換し、最小2乗法を用いて、フィルタ係数 h を求めた。数値計算手法としては Levinson アルゴリズム ^{7, 8)} (反復法によるアルゴリズムで、計算量を $O(M^3)$ のオーダーから $O(M^2)$ に減少させる) による高速算法を用いた。算出したフィルタ係数を用いてランダム音の

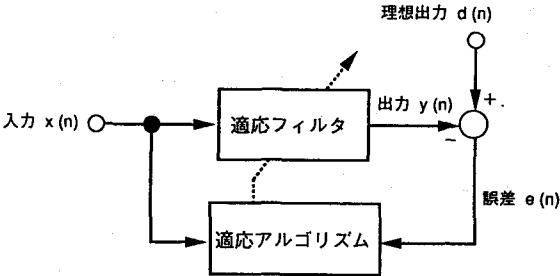


図4 適応フィルタの基本構成

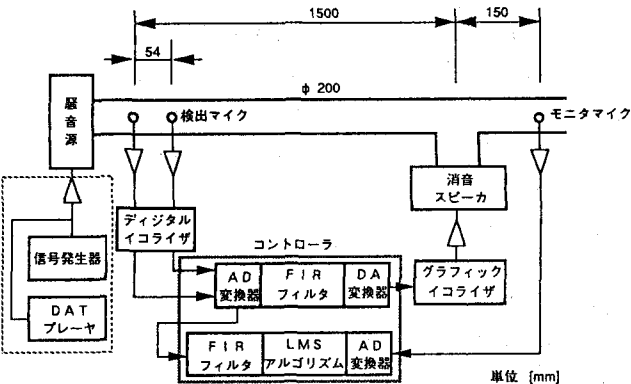


図5 実験ブロック図(基本性能実験)

消音実験を行なったときのモニタマイクロフォン点における消音効果を図6に示す。(サンプリング周波数 f_s : 5.51 [kHz]、フィルタ次数: 512)

900~1200 [Hz]で減衰量が小さい原因としては、音響フィードバックのゲインが大きく、システムが不安定になっていることが考えられる。図7は -TDS・Ta ゲイン特性であるが、900~1200 [Hz]で 0 [dB] に近い値となっていることがわかる。固定型FIRフィルタで減衰量をさらに大きくするためには、システムの安定性を考慮したフィルタ係数の算出が必要であるといえる。

次に適応型FIRフィルタを用いたときの消音効果について述べる。電気信号のみのシステム(エコーキャンセラ等)と異なり、ダクト消音の場合、エラー信号すなわち、モニタマイクロフォン出力が時間遅延を含んだ歪みを受けた後に観測されることが問題となる。そこで、検出マイクロフォン出力にこのエラーの歪み特性を畳み込んだ値を入力信号として、LMSアルゴリズムを適用する手法(Filtered-X LMS)⁹⁾を採用した。図8に $f_s=5.51$ [kHz]、22.0 [kHz] 時のランダム音消音実験結果を示す。結果はフィルタ次数(次数 512)がほぼ収束した時点のものである。 $f_s=22.0$ [kHz] の場合 100~1200 [Hz]で 10~20 [dB] 消音できている。また、図より高周波領域で消音効果を大きくするには高速サンプリングが有効であることがわかる。

4. 2 実機適用実験

空調機(2馬力)室内ユニットの吹出側ダクトにアクティブ消音を適用した実験のブロック図を図9に示す。供試ダクトの口径は、200×200 [mm]、全長 2 [m] で、ダクト内風速は、3.5~4.7 [m/s] である。コントローラには適応型FIRフィルタを使用し、マイクロフォンには自己気流騒音を防止するためにウィンドスクリーンを装着した。

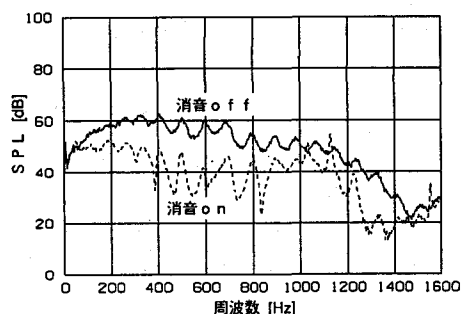


図6 ランダム音の消音効果(固定FIR)

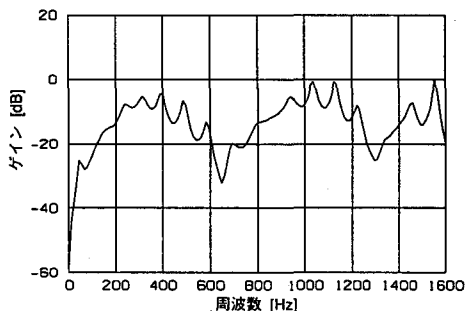


図7 -TDS・Ta ゲイン特性

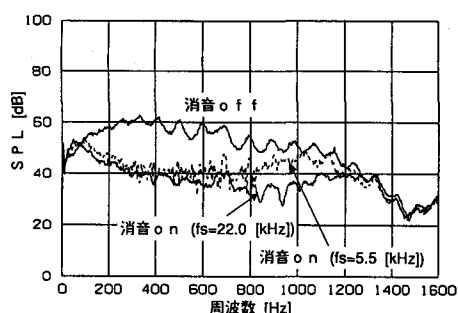


図8 ランダム音の消音効果(適応FIR)

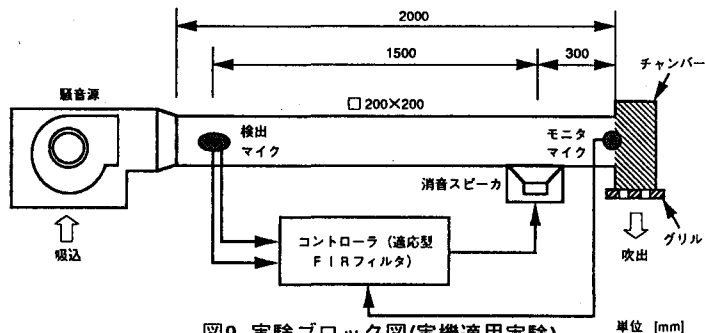


図9 実験ブロック図(実機適用実験)

ダクト出口に風量および風向を調節するためのチャンパー、グリルが無い場合と、有る場合のモニタマイクロフォン点における消音効果を図10に、検出マイクロフォン～モニタマイクロフォン間のコヒーレンスを図11にそれぞれ示す。チャンパー、グリルが無い場合、150 [Hz] から平面波近似が成立する900 [Hz] 付近まで消音効果が得られているが、チャンパー、グリルが有る場合は、線形性が悪く、消音帯域、消音量も小さくなっている。これはチャンパー、グリルで発生する2次騒音とチャンパー、グリルによるダクト音響特性の変化が原因と考えられる。すなわち、2次騒音はノイズとしてモニタマイクロフォン出力に含まれるため、適応フィルタの収束を悪くし、音響特性変化は(3.2)式のコンローラ特性のFIRフィルタによる実現を困難にしていると考えられる。今後、ダクト出口条件が消音効果に及ぼす影響を定量的に検討していく予定である。

5. あとがき

今回の実験結果を以下にまとめる。

(1) 基本性能実験 (騒音源: スピーカ)

- ・固定型および適応型FIRフィルタにより、広帯域ランダム音を10～20 [dB] 消音できることを確認した。
- ・適応型FIRフィルタでは高周波域(1 [kHz] 以上)の消音に高速サンプリングが有効となる。

(2) 実機適用実験 (騒音源: 送風機)

- ・ダクト出口にチャンパー、グリルが無い場合、スピーカ音源と同様な消音が可能であることを確認した。
- ・ダクト出口にチャンパー、グリルが有る場合、気流による2次騒音の発生、ダクト音響特性の変化が消音効果に悪影響を及ぼす。

【参考文献】

- 1) P. Lueg : U. S. Patent No.2043416 (1936)
- 2) R. F. La Fontaine, I. C. Shepherd : J. Sound and Vib. Vol.91(3), pp. 351-362 (1983)
- 3) M. L. Munjal : "ACOUSTICS OF DUCTS AND MUFFLERS", pp. 6-12 WILEY-INTERSCIENCE (1987)
- 4) C. F. Ross : J. Sound and Vib. Vol.80(3), pp. 373-380 (1982)
- 5) S. Haykin, 武部 幹訳 : 「適応フィルタ入門」 現代工学社 (1987)
- 6) B. Widrow, S. D. Stearns : "ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING" PRENTICE-HALL (1985)
- 7) R. A. Wiggins : J. Geophysical Research Vol.70(8), pp. 1885-1891 (1965)
- 8) 浜田 晴夫 : 日本音響学会誌 Vol.43(4), pp. 267-276 (1987)

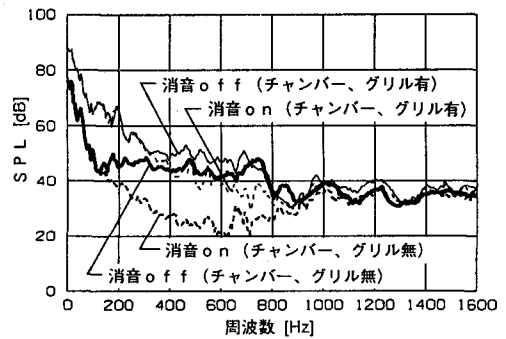


図10 実機適用実験結果(適応FIR)

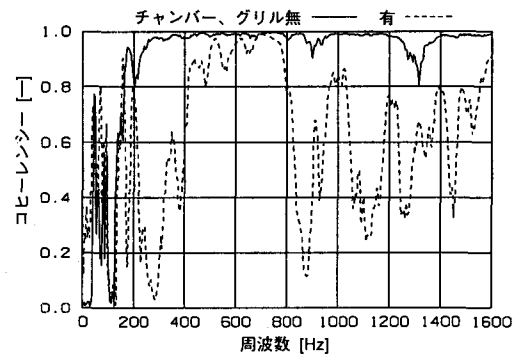


図11 検出マイク～モニタマイク間のコヒーレンス