

ダクト用電子消音システムの構成

—マイコン制御によるデジタルフィルタの実現—

浜田 晴夫、 榎田 隆氏、 三浦 種敏 (東京電機大学)

高橋 稔、 栗林 卓、 浅見 欽一郎 (日立プラント建設(株)研究所)

1. はじめに

音響ホール、病院、スタジオなどでは空調設備から発生する騒音が問題となるため、その消音対策は、重要である。特に、ダクト内低周波音に対する消音を共鳴や干渉などの現象を利用して行う、いわゆる受動型ダクト消音器は広く実用に供されているものの、サイズ、流量損失などの点でその改善に対する要求が多い。

一方、これに対し、考え方の歴史は古いが、騒音と逆位相の2次音源を用いてこれを消音しようとする電子消音技術が着目されつつあり、電子デバイス、信号処理技術などの急速な発達とあいまって、最近さまざまな観点からの研究成果が次々と発表されている。

しかしながら、解決すべき多くの問題が山積しており、現在まだ本格的実用段階には至っていない。我々はダクト端部での消音ではなく、むしろ管路網途中に設置する電子消音システム(ECS: Electric Cancellation System)の開発を目的としている。(1)~(3)

ここでは、まず電子消音システムの等価回路について述べ、そこで必要とされる消音用デジタルフィルタの設計とその特性について議論する。また、現実のダクトを用いた実験例についても多少ふれてみたい。実験では、LSA(Least Square Algorithm)によりマイクロコンピュータを用いてフィルタ係数を算出し、実時間FIRフィルタとして消音用フィルタを構成、実現したものについて報告する。

2. 電子消音システムのモデル化

ダクト内に付加音源を設置し、消音を行う場合、通常、この2次音源を駆動する信号は騒音源から抽出した情報をもとに合成される。騒音源が周期的低周波音の場合、たとえばエンジンの回転周期などの非音響的トリガにより波形の合成が可能である。

しかしながら、一般には付加音源よりupstream側にマイクロホンを設置し、これにより收音した音からなんらかの方法で駆動用電気信号を合成する方法が必要となる。従って、2次音源よりupstream側のマイクロホンに向かう音、すなわち、音響的フィードバックが形成されるため、これに対する対策が必須となる。また、付加音源の配置については、平面波伝搬以外の不用なモードの伝搬を極力避けるような最適配置なども重要な問題となってくる。以下では、MONOPOLEシステムに関するシステム表現を考える。なお、DIPOLEシステムなどの構成についても同様の考え方が適用できる。

2-1 一般的な MONOPOLE システム

電子消音システムで精度の良い消音を行うためにはダクト内の音の伝搬のほか、マイクロホン、スピーカなどの電気音響変換器の特性補正も重要であることは明らかである。そのため、制御系設計の基礎となるモデルの構築に際しては、これら電気音響変換器の特性も含めて議論する必要がある。さらに、モデル内の各要素が明確に定義されていることが必要であろう。

図1に一般的な MONOPOLE システムとして構成した電子消音システムを示す。また、図2に同システムを表現するブロック線図を示す(すべての伝達関数は、Z変換とする)。

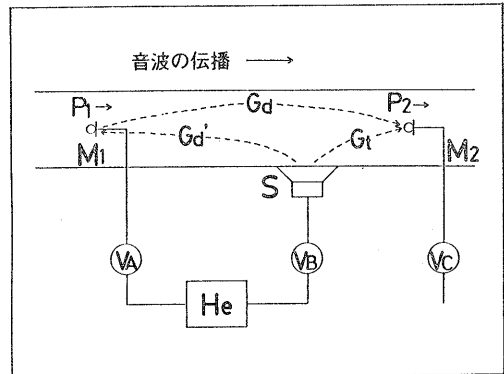


図1 一般的 MONOPOLE システムの構成図

このモデルに際し、次の点に留意した。

(1) 各要素の伝達関数の明確な定義、測定および制御の容易さを考慮して、伝達関数の入出力に電氣的に測定可能な点(図中、VA, VB, VC)を取り入れた。

(2) 残留騒音の評価は、付加音源より downstream 側に適切に設置されたマイクロホン端子の電圧 VC で行う。

さらに、 H_r , H_t を図2のように定義することで、図3のようなブロック線図を得る。これにより、 $V_C = 0$ とおくことにより、ただちに本 MONOPOLE システムの消音用フィルタ H_e が次式のように求まる。

$$H_e = \frac{-G_d(H_{M2}/H_{M1})}{H_t - G_d(H_{M2}/H_{M1})H_r} \quad (1)$$

H_e を決定するためには、 $G_d(H_{M2}/H_{M1})$, H_t , H_r の各伝達関数が必要となるが、これらはいずれも測定点を VA, VB, VC として同定可能であることが分かる(H_{M2}/H_{M1} を知る必要は特になく、 $G_d(H_{M2}/H_{M1})$ が同定できればよい)。また、 H_e は、フィードバック系の特性方程式 $1 - H_e H_r = 0$ のすべての根が単位円内にあるときに安定である。安定性判別は Schur-Cohn の判定条件などで確認できる。

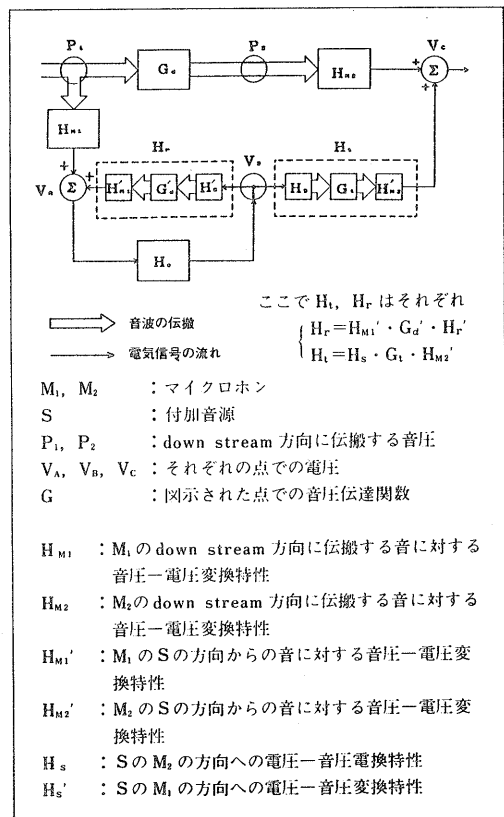


図2 一般的 MONOPOLE システムのブロックダイヤグラム表現

一例として、図4に示した設定条件のもとでの伝達関数の測定結果例を図5に示す。これは、吸音材（グラスウール96kg/m³、25mm厚）によるH_rのスペクトル変化を示している。このシステムについて安定判別を行った結果、付加音源とupstream側に設置されたマイクロホン間の内壁全面に吸音材によるライニング処理を施したものの（図中、一点鎖線）のみが、かろうじて安定であった。

しかしながら、同図に示したようにH_rなどの周波数特性の平坦さが失われるため、一般にフィルタH_eのインパルス応答長が長くなる。このように、図1のようなMONOPOLEシステムでは、付加音源とupstream側のマイクロホン間に、吸音材処理あるいは距離を極端に離すなどの何らかの処理によって減衰特性をもたすことがフィルタを安定に実現するためには必要である。

従来は、この問題に対処するために、別の付加音源用ラウドスピーカを設置し、これら複数個の付加音源により指向特性を持たせたり、あるいはupstream側のマイクロホンを工夫して付加音源からの音を抑圧したりする試みが行われてきた。^{9), 10)}

しかしながら、元来、指向特性を付けにくい低周波帯域が対象であることや、複数個のデジタルフィルタ、ディレイ素子など電子回路が複雑になるなどの問題があった。MONOPOLEシステムは、上述のような問題があるものの、構成要素が少なくシンプルであるために、制御（スピーカなどの相互干渉が問題とならない）、保守、経済性などの点ですぐれている。そこで、MONOPOLEシステムの簡単な構成を残し、しかも上述の安定性の問題を解決するために、次節のようなシステム構成を提案する。

2-2 Dual Sensing Microhone (DSM) 方式

本方式は、消音用デジタルフィルタの入力となる電気信号を2コのマイクロホンを用いて dual sensing して得られた信号から合成するものであり、構成はきわめて簡単で、他に差動増幅器さえ用意すればよい。

図6にシステム構成図を示す。同システムの等価回路は図7のようになる。これより、マイクロホンM2の出力V_Cは次式で示される。

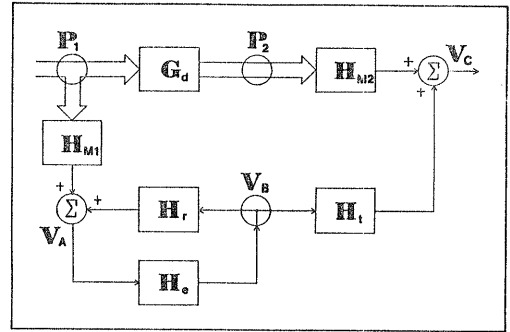


図3 単純化した消音システムのブロック線図

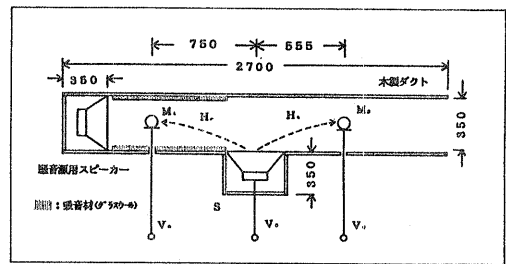


図4 実験の設定図

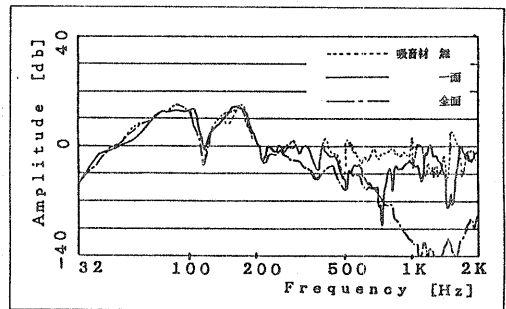


図5 吸音材による伝達関数 (Ht) の振幅特性の変化

$$V_c = \frac{P_1 [H_{M1} H_e H_i + G_d H_{M2} (1 - H_e H_r)]}{1 - H_e (H_r - H_i)} \quad (2)$$

消音用デジタルフィルタの伝達関数 H_e は、式 (2) で $V_c = 0$ として求めることができる。これは式 (1) で示される伝達関数と等しい。

ここで、付加音源であるスピーカ S から、マイクロホン M_1 、 M_2 への距離を等しく、かつ M_1 と M_2 は同一の無指向性マイクロホンとすると、

$$H_i = H_r \quad (3)$$

となる。従ってこの場合、 S から M_1 への帰還は打ち消され、発振することはない (式 (2) 参照)。

現実には、上述のような理想状態は存在しないが、着目している帯域が低周波であるため逆にこのような条件は実現しやすくなる。さらに、実験的にも、実用上十分に発振を抑制できることが種々のダクト、設定について確かめられている。

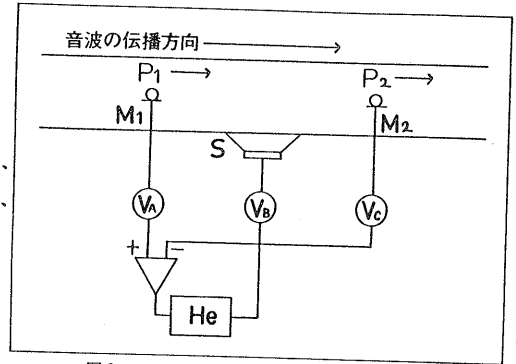


図6 DSM (Dual Sensing Microphone) 方式 MONOPOLE システムの構成図

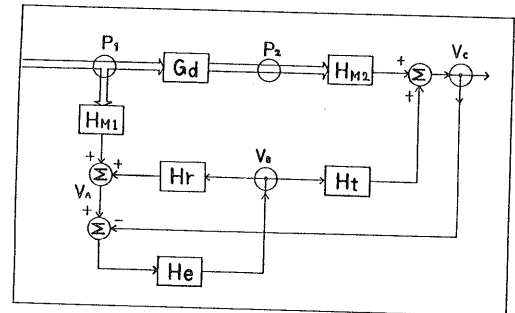


図7 提案した MONOPOLE システムの等価回路

3. 消音用デジタルフィルタの設計

ここでは、マイクロホン、ラウドスピーカ等の電気音響機器の特性並びにダクト内での音響的伝達関数等は、気流に伴う変化や経年的な変化はないものとし、すべて線形時不変なシステムと仮定する。これらも含めてシステムを一般的に扱い、消音用フィルタをアダプティブフィルタ (adaptive filter) として構成実現する方法については、稿を改めて報告する。

さて、式 (1) で示された消音用フィルタの伝達関数 H_e は、基本的にはラウドスピーカの特性も含めた逆フィルタである。さらに、重要な点は、通常ラウドスピーカ等の特性補正で行われているような、時間遅延を許容したフィルタの実現が許されないという点にある。(11)

ところで、いわゆるデコンボリューションと称されている分野では、出力誤差のエネルギーを最小とするという設計基準により実現される、Shaping filter と呼ばれるフィルタが古くから実用に供されている。(1)~(4) 最近、ラウドスピーカシステムなどの音響特性補正のために、この手法を適用した例がいくつか報告されている。(5)~(8)

3-1 LSA (Least Square Algorithm) (1)~(8)

周知のように、この設計法は誤差のエネルギーを偏微分し、0とおくことで容易

3-2 フィルタ係数の算出例

式(4)のbとして、単位サンプル応答を与えた場合の解が Least error energy の意味で最適な逆フィルタである。このとき、解gは、hの位相特性に関係なく、いつでも最小位相数列となる。このような性質は波形の位相的性質を問題とするような応用には、注意を必要とするが、本研究のように騒音を扱う分野での応用には問題はないものと思われる。

そこで、本設計法を消音用デジタルフィルタの係数算出に適用してみる。まず、3つの伝達関数 $G_d(H_{M2}/H_{M1})$, H_r , H_t をクロススペクトル法により算出する。これらを用いて式(1)の分子、分母の伝達関数を求める (FFTによる直線上たたみ込み)。さらに、それぞれの逆FFTから、式(4)のh, bを決定する。この場合、hは分母の逆FFTの結果であり、bは分子のそれである。

図8の(c), (d)にh, bの算出例を示す。これは、後述する消音実験で実際に用いたものである。なお、クロススペクトル法による伝達関数算出は、標準化周波数6.4kHz, FFTポイント数2048回であり、擬似白色雑音を用いて系を駆動し、ハニング窓(50% overlap)により切出し処理し、64回の加算平均を行って求めた。

このようにして求めたh, bからhの自己相関関数、hとbの相互相関関数(図8、(a), (b))をそれぞれ算出し、Levinson アルゴリズムにより、式(8)で示される近似フィルタ係数を最終的に得る。

以上の音響計測、信号処理はすべてマイクロコンピュータ(PC9801シリーズ)と自作のA/D, D/Aシステムを用いて行った。予備実験の結果から、フィルタ係数として1024点程度が必要となる場合があることが確かめられている。これを、正規方程式の直接解法によって求めることは、マイクロコンピュータでは到底実用的ではないが、上述のアルゴリズムを用いることにより約数分で算出可能であった。

図9に、この例についてのh(図(b))とその振幅周波数特性(図(c))を示す。また、同図(a)では、評価点をM2とした場合の減衰量のシミュレーション結果を示している。図中、減衰量はdBで負値としてプロットしてある。このシミュレーション結果から、約80Hz以上から800Hz程度までの広帯域に渡る消音が期待されることが分かる。

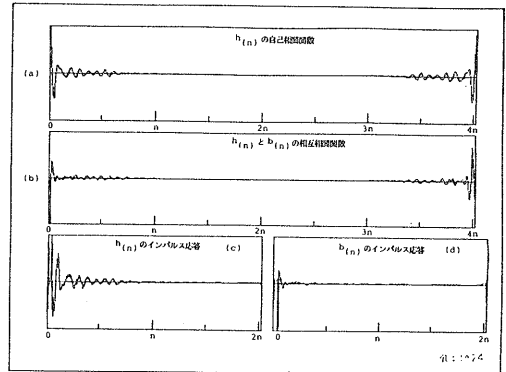


図8 フィルタ係数の算出過程

ここで、 $h(n) = \mathcal{F}^{-1} |H_r - G_d(H_{M2}/H_{M1})H_r|$, $b(n) = \mathcal{F}^{-1} | -G_d(H_{M2}/H_{M1})|$, \mathcal{F}^{-1} : IFFT

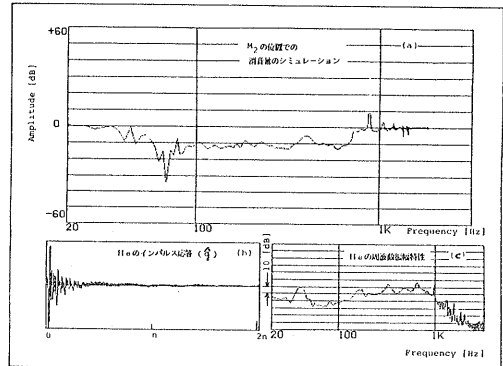


図9 算出されたデジタルフィルタの特性と、M₂位置での消音量シミュレーション

4. リアルタイムデジタルフィルタを用いた消音実験

4-1 設定

実験で用いた各種設定を下記に示す
(図10参照)。

<ダクト>

- ・ダクト口径：350 mm
- ・ダクト長：15 m

<使用音用デジタルフィルタ：PDP1024 (DIGITAL AUDIO CORPORATION)>

- ・標準化周波数：6.4 kHz
- ・係数長：960 ポイント

<騒音源>

(I) ラウドスピーカを白色雑音 (20 Hz ~ 20kHz) で駆動。

(II) ファン騒音+ラウドスピーカによる擬似騒音 (I) に同じ)。

- ・ファン：シロッコファン

(風量 40 m³/min, 静圧 40 mmAg, 電動機出力 1.5kW) をダクト端部に設置。

4-2 結果

騒音源 (I), (II) のそれぞれについて、電子消音器 (ECS) を動作させた場合 (ON) と停止させた場合 (OFF) の双方のダクト内騒音レベルを測定した。評価用マイクロホン位置は、マイクロホン M2 から 2m down stream 側である。

結果を図11, 図12に示す。それぞれの図では、A特性で測定された騒音レベルの周波数特性と、レベルレコーダによるオーバーオール値を示してある。一見して、10 dB以上の消音量が得られるのは、約80 Hz以上800 Hz以下の帯域であることが分かる。また、オーバーオール値はラウドスピーカによる擬似騒音 (I) の場合、16.5 dB(A)であり、また、気流騒音を伴った場合 (II) でも、16 dB(A)の消音量が確保されている。さらに、ECS動作中の騒音レベルの変動は少なく、安定に動作していることが分かる。

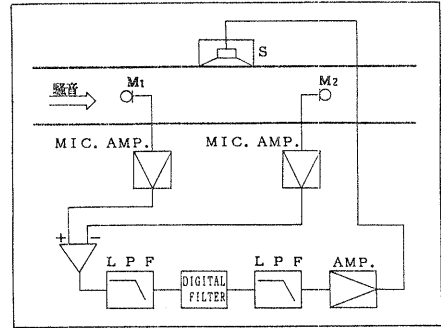


図10 実験システムの構成

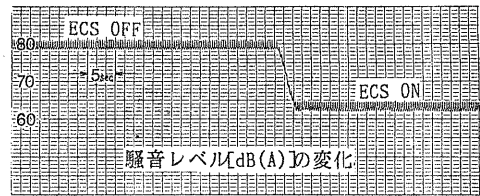
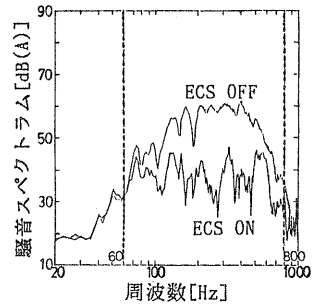


図11 広帯域騒音の消音効果

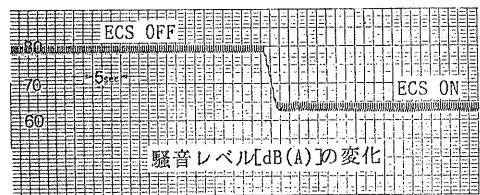
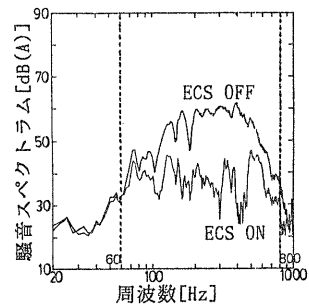


図12 広帯域騒音の消音効果 (気流v 3.8m/S 有)

一方、80 Hz 以下の消音量が十分でないが、これは、ダクト内音波伝搬の姿態、付加音源用ラウドスピーカの低域でのパワーの確保等、今後さらに検討を行うべき多くの問題を示唆している。

5. まとめ

管路用電子消音システム (ECS) として、ダクト内音圧伝達関数、電気音響変換器等を線形時不変システムと仮定し、システム構成の基礎となるモデルを示した。また、このモデルによる表現を用いて、DSM (Dual Sensing Microphone) と称する新しい MONOPOLE システムの提案を行った。さらに、DSM 方式で使用される消音用デジタルフィルタを、LSA (Least Square Algorithm) を用いて設計し、実時間 FIR フィルタとしてシステム構成を行った。

次に、本システムをダクト (口径 350 mm, 長さ 15 m) に設置し、2 種の騒音源についての消音実験を行った。その結果、ラウドスピーカによる広帯域擬似騒音の場合も、気流 (3.8 m/s) を伴った騒音の場合の双方に対しても、少なくとも 80 Hz 以上では優れた消音効果 (オーバーオール値で 16 dB(A)) が安定して得られることがわかった。

今後は、さらに低域での消音効果の改善を確保すべくダクト系、電気音響変換系、電子回路系に関して総合的な検討を行っていくとともに、機器の経年変化、気流に伴う諸効果等に細かに対応するために、アダプティブなフィルタリングについても検討を行っていく予定である。

< 参考文献 >

- 1) Enders A. Robinson, "Statistical Communication and Detection", Chap. 7, GRIFIN, LONDON, 1967
- 2) Levinson, N., "The Winer RMS Error Criterion in Filter Design and Prediction", J. Math. Phys. Vol 25, 1947
- 3) E. A. Robinson, "Mathematical Development of Discrete Filters for Detection of Nuclear Explosions", Journal of Geophysical Research, 68, 1963
- 4) R. A. Wiggings and E. A. Robinson, "Recursive Solution to the Multichannel Filtering Problem", Journal of Geophysical Research, 70, 1965
- 5) Richard E. Blahut, "Fast Algorithms For Digital signal processing", Chap. 11, ADDISON-WESLEY PUBLISHING, 1985
- 6) 羽生, 山越, 吉川, "音響伝達系の波形状伝達特性補償に対するコンボリュション中間, ヲライザ, 用", "音響伝達系論集", 56-10, 1984
- 7) 濱田, 他, "10音響特性補正について", "信学電音研資料 EA 18-5", 1984
- 8) P. M. CLARKSON, et al, "Spectral, Phase, and Transient Equalization for Audio System", J. Audio Eng. Soc., VOL. 33, No. 3, 1985
- 9) Kh. Egtes, J. Sadi, H. G. Leventhall, "Comparison of Active Attenuators of Noise in ducts", Acoustics Letters, VOL. 4, No. 10, 1981
- 10) M. A. Swinbanks, "The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts", J. Sound and Vibration, 27(3), 411-436, 1973
- 11) 濱田, 他, "音響特性補正用等化器特性について", "信学電音研資料 EA 18-5", 1984
- 12) 榎田, 他, "8路電子消音システムの設計と実現", "音講論集 P 333", 1983
- 13) 高橋, 他, "1路電子消音システムの設計と実現", "音講論集 P 333", 1983
- 14) 高橋, 他, "9路電子消音システムの設計と実現", "音講論集 P 333", 1983