室内での周期的低周波騒音の適用形能動消音*

本田 善久^{*1}, 松 久 寛^{*1}, 佐 藤 進^{*1}

Adaptive Active Attenuation of Periodic Low-Frequency Noise in a Room

Yoshihisa HONDA, Hiroshi MATSUHISA and Susumu SATO

This paper is concerned with the problem of active attenuation of periodic low-frequency noise in a room. A system utilizing the signal from a reference microphone and a synchronous signal from a noise source has been developed. The results show that the adaptive scheme can cope with variations in noise characteristics, and that the controller compensates the nonlinear distortion of the secondary source to achieve optimum attenuation. It is also found that the synchronous average of the reference signal suppresses the influence of other sounds such as conversation to maintain optimum attenuation.

Key Words: Noise, Noise Abatement, Active Noise Control, Periodic Noise, Low-Frequency Noise, Enclosed Sound Fields, Synchronous Average

1. ま え が き

近年のデジタル機器の発展, 普及に伴って, デジタル技術を利用した能動消音法が騒音対策の現実的な手法の一つとして注目されている。デジタル方式の能動消音システムは, 処理速度の面から, 周期の短い高周波音より周期の長い低周波音を対象とするほうが容易にかつ経済的に構築できる。一方, 古くから用いられている共鳴形消音器などによる受動的な消音法は, 一般にその装置の大きさが波長に比例するため, 高周波の騒音に対しては実際的で有効な手段であるが, 波長の長い低周波音に対しては適していない。したがって, 低周波騒音に対する能動消音システムは有用であると考えられる。

機械騒音の低周波成分は, 多くの場合, 周期的である。例えば, エンジンやファンなどの回転機械の低周波騒音は, 一回転ごとに繰返される現象に起因するものであるため, 回転の周波数の整数倍の成分によって構成されている。したがって, 消音システムの対象とする騒音特性に周期性を前提としても, その有用性は損なわれないであろう。

初期の能動消音に関する研究が対象としていた音場は主としてダクトのような一次元空間であったが, 最近では室内のような三次元閉空間を対象とする研究も活発に行われるようになってきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。Nelson らは⁽¹⁾, 閉空間における音響エネルギーの能動的な最小化について詳細な検討を行っている。三好らは⁽²⁾, 複数の二次音源を用いて室内に消音領域を生成する方法について検討している。西村らは⁽³⁾, 閉空間の定在波(こもり音)に注目した能動消音装置を作成してその有効性を確認している。

ところで, 実際に室内での消音を安定に行うためには, 対象とする音源と音場の特性の変動に適応しなければならない。また, 二次音源のスピーカの非直線ひずみなどの特性の悪影響を受けないようにしなければならない。さらに, 対象の騒音以外の室内に存在する会話などの意味のある音に影響されずに, 二次音源に供給する騒音制御信号を適切に作り出さなければならない。このような実用に際して問題となると考えられる点については, 従来の研究ではほとんど考慮されていないように思われる。

そこで, 本研究では, そのような実用上の問題点に重点をおいて, 室内の周期的低周波騒音に対する適用形能動消音法について検討する。また, その検討に基

* 原稿受付 平成2年6月25日。

*¹ 正員, 京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

づいて消音システムを試作し、その有効性を確認する。

2. 消音の手法

一般室内のような三次元閉空間において、回転機械などから放射される周期性を有する低周波騒音を、付加音源を用いて減少させる能動的手法について考える。対象の周波数が低いとき、その波長が長いので、一次音源（騒音源）と二次音源（付加音源）の距離を対象音の半波長より十分に短くすることが容易である。そのようにすることによって閉空間全体にわたる有効な消音が可能であることが導かれている⁽¹⁾。また、回転機械の騒音のように周期性があるとき、回転パルスのような信号に同期して騒音制御信号を出力するようにできる。そのようにすれば、一次音の検出用のマイクロホンは不要であり、二次音源のスピーカとマイクロホンによる発振のおそれがない⁽⁴⁾。

そこで、図1のようなシステムを考える。二次音源のスピーカは、一次音源に隣接して配置する。コントローラは、一次音源から同期信号を得て騒音制御信号を二次音源へ出力する。また、室内の参照点に設置したマイクロホンから得られる参照信号に基づいて、コントローラは最適な騒音制御信号を決定する。最適な騒音制御信号を求める方法を以下に示す。

騒音の基本周期に関する各信号の複素フーリエ係数について式をたてる。参照点での音圧の複素フーリエ係数を $R(k)$ 、そのうち一次音源、二次音源による寄与分をそれぞれ $P(k)$ 、 $S(k)$ とすると、

$$R(k) = P(k) + S(k) \quad \text{..... (1)}$$

図1 能動消音システムの概略図

と表せる。また、コントローラから出力される騒音制御信号、コントローラに入力される参照点からの信号の複素フーリエ係数をそれぞれ $X(k)$ 、 $E(k)$ とすると、次の関係式が成り立つ。

$$S(k) = H_s(k)X(k) \quad \text{..... (2)}$$

$$E(k) = H_m(k)R(k) \quad \text{..... (3)}$$

ここで、 $H_s(k)$ は騒音制御信号のコントローラから参照点までの伝達関数であり、二次音源のスピーカなどの特性も含まれている。また、 $H_m(k)$ は参照信号の伝達関数であり、マイクロホンの特性などが含まれている。式(1)～(3)より次式が得られる。

$$E(k) = H_m(k)[P(k) + H_s(k)X(k)] \quad \text{..... (4)}$$

ここでは、一次音源と二次音源との距離が対象音の半波長に比べて十分に小さく、参照点での音を消すことによって室内全体にわたって最適な消音が実現するものと仮定する。また、 $H_s(k)$ 、 $H_m(k)$ は零でないものとする。

最適な消音を実現するための条件は、上記の仮定と式(3)より $E(k)$ を零とすることである。したがって、最適な騒音制御信号 $X_{opt}(k)$ は、式(4)より

$$X_{opt}(k) = -\frac{P(k)}{H_s(k)} \quad \text{..... (5)}$$

で与えられる。いま、ある $X(k)$ に対して、式(4)で関係付けられる $E(k)$ が得られているとする。このとき、式(4)を変形すると、

$$P(k) = \frac{E(k)}{H_m(k)} - H_s(k)X(k) \quad \text{..... (6)}$$

となる。式(6)を式(5)に代入すると、

$$X_{opt}(k) = X(k) - G(k)E(k) \quad \text{..... (7)}$$

が得られる。ただし、 $G(k)$ は

$$G(k) = \frac{1}{H_s(k)H_m(k)} \quad \text{..... (8)}$$

で表されるもので、騒音制御信号がコントローラから二次音源、音場、参照用マイクロホンを経てコントローラにもどるパスの逆伝達特性を意味する。また、式(7)は騒音制御信号 $X(k)$ を誤差信号 $E(k)$ に基づいて修正することを表していると解釈でき、 $G(k)$ は修正量に関する重みになっている。

重み $G(k)$ をコントローラが決定するには次のよう

図2 システムブロック線図

にすればよい。二組の $X_i(k)$ と $E_i(k)$ が得られているものとする ($i=1, 2$)。各組について式(4)をたて、両辺の差をとると、式(8)より、

$$G(k) = \frac{X_2(k) - X_1(k)}{E_2(k) - E_1(k)} \quad (9)$$

が得られる。

したがって、原理的には、信号を出力して参照信号を取得する動作を2回行えば、式(7)、(9)によって最適騒音制御信号が求められる。しかし、実際のシステムでは計算誤差などが伴うため、求められる値は近似値である。そこで真の最適値に近づけるためには、上記の動作を反復すればよい。すなわち、直前の2回の動作の結果から、式(7)、(9)によって決定される騒音制御信号を次の動作で出力するというを繰返す。この反復動作によって騒音制御信号は改良されて、最適値に収束することが期待される。このアルゴリズムは、室内のこもり音に対して西村ら⁽³⁾が採用しているものや、ダクト内の騒音に対して小坂ら⁽⁴⁾が採用しているものと基本的には同じである。

なお、最初の動作では $X(k)$ を零としてよい。2回目の動作での $X(k)$ は任意であり、重み $G(k)$ がある程度の精度で求められればよいのであるから、一時的にであれ対象室内の騒音を増大させる可能性があるため、むやみに大きくしないのが得策であろう。また、最適値に収束してくると、式(9)の右辺の分母、分子の値が小さくなり、 $G(k)$ の誤差が大きくなる。そのような場合には、 $G(k)$ の更新を停止するなどの対策をとって、誤動作を回避するようにすればよい。

図3 過渡特性 (数値シミュレーション)

さて、一次音源の振幅や位相が変動する場合について検討する。その変動は $P(k)$ の変動であり、式(4)より $E(k)$ に反映される。よって、式(7)により騒音制御信号が修正される。したがって、その変動が上記の反復動作の時間に比べて緩やかであるならば、十分に適応できる。また、音場の特性が変動する場合には、 $H_s(k)$ が変わるので、 $E(k)$ が変わるとともに、式(8)より $G(k)$ も変わる。よって、 $E(k)$ の変化によりまず騒音制御信号が変えられ、その結果、 $G(k)$ が修正されるので、次には騒音制御信号が修正される。したがって、この場合も変動が緩やかであれば、十分に適応できる。

次に、二次音源のスピーカや参照用のマイクロホンなどが非直線ひずみなどの非線形性を有する場合について検討する。この場合は、 $H_s(k)$ や $H_m(k)$ が非線形であることに相当するので、式(8)より $G(k)$ が非線形であることになる。式(7)は系が線形であることを仮定して導いたものであるから、誤差が生じる。しかし $G(k)$ が局所的に線形とみなせるならば、式(9)の右辺はその局所的に線形化した近似値を与える。したがって、非線形性が小さければ、動作の反復によって最適値に収束することが期待される。

非線形性の影響に関する数値シミュレーションで得られた過渡特性を図3に示す。シミュレーションでは、二次音出力系が $x + \epsilon x^3$ の形の非線形性を持っているものとし、 $\epsilon = 0, -0.01, -0.02, -0.05$ の場合を図に示した。一次音の波形は三角波とし、 $\epsilon = 0$ のときの最適騒音制御信号の片振幅が $x=1$ となるようにしてある。有効数字が10進数で約7けたの単精度で計算を行ったので、130~140 dB程度の消音を得られた時点で最適値に収束したと判断してよい。二次音出力系が線形の場合には、最初の計算で得た騒音制御信号によって約110 dBの消音を得られ、次の反復改良によってほぼ最適値に収束している。非線形の場合、非線形性が大きくなるほど収束の速度は遅くなるが、線形の場合と同レベルに収束している。したがって、非線形性があまり小さくなければ、反復改良によって十分消音できると言える。

ところで、一般に騒音対策としての消音を行う目的は、一次音源による騒音によって室内の会話などが妨害されないようにすることである。つまり、実際に消音を必要とする室内には、騒音に悩まされる人々がいて、会話などの意味のある音が存在しているのが普通である。したがって、現実のシステムでは式(1)の右辺にさらに一次音源と無関係の信号が加わっている。その信号は消音システムにとっては雑音であり、その

ままでは参照信号に雑音が混入して誤動作の原因となる。そのため、その雑音を抑圧し、消音システムが安定に動作するようにしなければならない。

消音対象の信号が周期性を有している場合を扱っているため、雑音抑圧の方法としては同期式積算平均法が有効であると考えられる。すなわち、コントローラに入力される参照信号を $e(t)$ とし、一次音源の基本周期を T 、平均回数を N とすると、一次音源からの同期信号を利用することによって次のような平均をとる。

$$\bar{e}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e(t+nT) \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

騒音制御信号の計算では、この平均 $\bar{e}(t)$ の複素フーリエ係数を $E(k)$ として用いばよい。式(10)の積算平均によりランダム雑音成分が抑圧されることは計測データ処理の分野でよく知られているので、ここでは周期性雑音が抑圧されることを確認しておく。

正弦波信号に対する同期式積算平均の振幅比 A を求めると、次のようになる。

$$A = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(N\pi f)}{\sin(\pi f)} \right| \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

ただし、信号の周波数 f は周期 T を基準にして正規化してある。振幅比 A は、 f に関して周期 1 の周期関数であり、かつ偶関数である。 Nf が整数でかつ f が非整数のとき最小値零をとり、 f が整数のとき N と無関係に最大値 1 をとる。また、 f が非整数では 1 より小さく、 N が大きいほどその抑圧量が多い。その例を図 4 に示す。

図 4 同期式積算平均による周期性雑音の抑圧

よって、同期式積算平均処理を参照信号に施せば、雑音を抑圧して対象とする周期音だけを抽出することができるので、安定した消音動作が期待できる。平均回数 N は、必要とされる雑音抑圧量が得られるように決めればよい。

3. 実 験

上記の手法を用いた能動消音システムを汎用パーソナルコンピュータを利用して試作して、その性能試験を行った。用いたパーソナルコンピュータには、DA コンバータ、AD コンバータ、ディジタル入力備えられている。騒音制御信号は 12 ビットの DA コンバータから出力され、パワーアンプを通して二次音源のスピーカ (直径 100 mm) を駆動する。参照信号は、マイクロホン (1/2 インチ) からアンプを通して AD コンバータに入力される。DA コンバータの出力と AD コンバータの入力にはローパスフィルタがいてある。一次音源からの同期信号は、ディジタル入力でパーソナルコンピュータに取り込まれる。

プログラムでは、騒音制御信号の出力、参照信号の入力と積算、同期信号の監視を行う部分は、インターバルタイマによる割り込み処理によって行うようにしてある。基本周期 1 周期当たりのサンプリングの回数があらかじめ決められた値になるように、前回の周期をもとにタイマのインターバル値を調整し、同期信号に合わせて信号の入出力ができるようにしてある。この割り込み周期の調整によって、一次音源の基本周期の変動に適応する。

プログラムの主処理の部分は、参照信号の積算回数あらかじめ決めてある回数に達するのを待って、その後最適値の計算を行い、そして新たな騒音制御信号をセットしたことを信号入出力の割り込み処理部に通知するという動作を繰り返す。信号入出力の割り込み処理の合間に最適値の計算を実行する時間的余裕がいくらかでもあれば処理が進んで行く。したがって、処理速度の比較的遅い安価なハードウェアを使用しても、1 回の反復動作に要する時間が長くなるため適応動作が遅くはなるが、消音すること自体は可能である。

以下に、実験結果を示す。実験は、容積約 85 m³ の実験室で、発振器とスピーカによる模擬音源と、小形の軸流ファンに対して行った。

まず、模擬音源に対する実験結果を示す。模擬音源のスピーカは二次音源と同タイプのものであり、両スピーカの中心間距離は 150 mm とした。参照用マイクロホンは両スピーカの前方 1 m の位置に置いた。発振

器からは 160 Hz の正弦波を出力したが、わずかではあるが一次音には高調波も含まれている。一方、能動消音システムは、基本周期 1 周期当たりのサンプリング回数を 64 回とし、消音対象とする音は基本波およ

び三次までの高調波とし、同期式積算平均の回数は 64 回とした。

消音の過渡特性の例を図 5 に示す。縦軸は、参照点の対象スペクトルのトータルのレベルで、消音システム作動前のレベルを 0 dB としている。使用した AD コンバータと DA コンバータは、ともにビット数 12 であるが、変換誤差は ± 1 LSB であり、さらにオーバーフローを避けるために実際に使用しているのはフルレンジの半分程度にしてある。したがって、この装置で実現可能な消音量は 50 dB 程度であると考えられる。最初の計算で求めた騒音制御信号によって約 20 dB の消音を得られ、3 回程度の反復改良動作でほぼ十分な消音状態に収束していることが図から確認できる。また、一次音源の振幅や周波数が変動する場合の過渡特性も調べたが、その変動に適応して同程度の反復回数で十分な消音状態に収束することが確かめられた。

FFT アナライザで求めた消音前後の音圧のパワースペクトルを図 6~8 に示す。各図の (a) は消音前、(b) は消音後のものであり、FFT アナライザの周波数レンジはすべて 500 Hz で、右端の三角印はそのレンジのオーバーオールレベルを表している。また、縦軸の相対音圧レベルは、消音前の 160 Hz のスペクトルレベルを 0 dB として表示した。

参照点でのパワースペクトルを図 6 に示す。基本波

図 5 過渡特性 (実験結果)

(a) 消音前

(b) 消音後

図 6 参照点での音圧のパワースペクトル (模擬音源: 160 Hz)

(a) 消音前

(b) 消音後

図 7 参照点から 1 m 離れた点での音圧のパワースペクトル (模擬音源: 160 Hz)

の 160 Hz では約 40 dB、三次の高調波の 480 Hz でも約 10 dB の消音が得られている。しかし、消音前には現れていなかったスペクトルが基本波のスペクトルを中心にして消音後に増大している。そのため、オーバーオールでは約 27 dB の消音にとどまっている。これは、信号入出力の周期の調整の精度が不十分なために、出力のタイミングがずれたり、1 周期当たりの出力点数の過不足が生じたりしていることに起因するものである。したがって、出力のタイミングを完全に合わせるようにすれば、除去できると考えられる。

参照点から横に 1 m 離れた点でのパワースペクトルを図 7 に示す。基本波の 160 Hz では約 20 dB の消音が維持されているが、三次の高調波の 480 Hz ではかえって数 dB 増大している。参照点から離れた位置で三次の高調波が消音できていないのは、一次音のそのスペクトルレベルがかなり低いために参照点でも十分な消音を実現できていないことに加えて、波長が短いことによる位相誤差が原因であろう。ちなみに、一次音源と二次音源の中心間距離の波長に対する比は、基本波で約 0.07、三次の高調波で約 0.21 である。

室内に一次音源以外に別の音源がある場合の参照点

でのパワースペクトルを図 8 に示す。別の音源は、300 Hz の正弦波である。周波数が別の音源に近い一次音の二次の高調波 (320 Hz) がかえって増大してしまっているが、基本波と三次の高調波は、別の音源がない場合と同じ程度に消音されている。一方、同じ条件で参照信号の平均処理をしない場合には、システムは不安定な動作をし、消音は実現しない。このことから、同基式積算平均によって対象音以外の雑音が十分に抑圧されていることがわかる。

実際の機械への適用例として、直径 150 mm の軸流ファンの回転騒音に対する能動消音システムの試験を行った。二次音源のスピーカとの中心間距離は 150 mm とし、吸い込み側を正面に向けて設置した。参照点は正面に 1 m 離れた点とした。ファンの羽の枚数が 7 枚であるので、回転騒音の主成分は、回転の周波数の 7 倍の羽の通過周波数である。

参照点における音圧のパワースペクトルを図 9 に示す。(a) は消音前、(b) は消音後のものであり、測定器のゲインは同一にしてある。消音システムの一回転あたりのサンプル数は 280、参照信号の平均回数は 64 である。羽の通過周波数は 160 Hz であり、そのスペクトル

(a) 消音前

(b) 消音後

図 8 参照点での音圧のパワースペクトル
(模擬音源: 160 Hz + 別音源: 300 Hz)

(a) 消音前

(b) 消音後

図 9 参照点での音圧のパワースペクトル
(軸流ファン回転騒音)

については約 23 dB の消音が得られている。また、オーバーオールでも約 7 dB の消音が認められる。

4. あ と が き

室内の周期的低周波騒音に対する適応形能動消音法について検討し、消音システムを試作してその性能を調べた。そのシステムは、従来から知られているアルゴリズムに基づくものであるが、対象の音源と音場の特性の変動に対して適応する能力を持っていること、二次音源のスピーカなどにある程度の非直線性ひずみがあっても、騒音制御信号がそれに対応して補正されるようになっていることを確認した。また、参照信

号に対して同期式積算平均処理を施すことによって、室内の他の音源からの悪影響を受けないで消音を安定に維持できることが明らかになった。

文 献

- (1) Nelson, P. A., Curtis, A. R. D., Elliott, S. J. and Bullmore, A. J., The Active Minimization of Harmonic Enclosed Sound Fields, *J. Sound Vib.*, **117**-1 (1987), 1.
- (2) 三好・金田, 音場の逆フィルタ処理に基づく能動騒音制御, 日本音響学会誌, **46**-1 (1990), 3.
- (3) 西村・藤田, 閉空間の音場制御に関する基礎試験, 機構論, No.900-14, C (1990-3), 248.
- (4) 小坂・山田, 周期性を持つ管内低周波音の能動的消音, 日本音響学会誌, **41**-5 (1985), 316.