アクティブノイズコントロールにおける ハウリングに対する考察* (二本マイク法の検討)

鈴木 成一郎^{*1}, 林 卓 郎^{*1}

Study on Howling in Active Noise Control (Two-Microphone Method)

Seiichirou SUZUKI and Takurou HAYASHI

A 1-microphone system is usually used to detect the signal of a noise source in an active noise control system. In this case, unstable oscillation, called howling, will occur according to the gain of the transfer function. In a long duct, where few reflected waves exist, a 2-microphone system has been used to eliminate the signal from the secondary source to detecting microphones. However, in a short duct, the reflected waves must be considered. The authors studied the acoustic conditions in the 2-microphone system theoretically with the existence of the reflected waves. The elimination effect from the secondary source was confirmed by simulation and experiment. The 2-microphone system is valid when sound absorption material is installed at the opposite side of the opening end.

Key Words: Sound, Simulation, Control Device, Active Noise Control, Howling, Reflected Wave, 2-Microphone Method

1. 緒 言

吸音材等を用いた受動的な騒音低減法から、音源とは別に設けた二次音源との干渉により騒音低減をする能動制御による方法へと手法の幅が広がってきている。

著者らはこれまでに長さ0.6mのダクト構造物に対してこの手法を適用して制御効果を確認してきた。文献(1)で述べた第1報ではデジタルフィルタを用いて騒音低減をする際の効果をシミュレーションにより予測して実験と比較した。さらに文献(2)で述べた第2報では系の特性が変化しても安定した効果の得られるように適応制御システムを構築してその効果を確認した。第1報では音源の音を検知する際にマイクロホンを用いた時の特性をその一巡伝達関数から発振(ハウリング)の条件を求めた。また第2報では適応制御の手法について、このハウリングが発生しないように騒音と相関の高い信号、例えば加速度信号を用いる構成で論じた。

本報告ではマイクロホンで騒音源の音を検知すると

きに発振(ハウリング)を発生させないための構成として従来から用いられている二本マイクロホン法について⁽³⁾音響面から考察を加えた。そしてこの考察結果をシミュレーションにより確認した。さらに実験からもその効果を確認し、アクティブノイズコントロールに適用する際の基本構成を求めた。

2. ハウリングの発生原因

アクティブノイズコントロールでは音源からの音の信号を検知してその信号に定められた伝達関数を畳み込み演算することで二次音源への出力を得る。したがって図1に示すように空間の伝達関数を定めると、二次音源(A)から検知用マイク(M)までの伝達関数 G_{AM} により閉ループ回路が構成されるために制御に用いる伝達関数 G のゲインによっては発振することがある。これがハウリングとも呼ばれる現象であり、制御効果を著しく低減する。

3. ハウリング成分に対する理論検討

ハウリングは制御効果を低減するのでこれを発生させないためにはどのような構成にするべきかを理論面から検討する。その基本は二次音源から発生する成分が図1における伝達関数 G への入力に含まれないよ

* 原稿受付 平成4年5月25日。

^{*1} 正員, (株)東芝研究開発センター (〒210 川崎市川崎区浮島町4-1)。

うにすることである。

ダクト管内における音圧成分の、伝ばに伴うエネルギー減衰が十分大きな場合は図2に示されるように無限長のダクト系と等価になる。したがって二次音源からの成分を二本マイクロホンで除去する手法が用いられてきた。しかしながら長さが短くなると図4のように両端の開口部におけるインピーダンスの不整合により反射成分が存在する。したがってこの系に対して二本マイクロホンを用いる場合は、これらの反射成分を考慮する必要がある。

そこで、これらの反射成分を加味した二本マイクロホンシステムの基本構成図を図3に示す。この時に二次音源の成分が含まれないという条件を満たすために二本マイクロホンのうちの P_{M2} に与えるべき伝達関数 G_1 を求める。条件としてはダクト内を伝ばする音は平面波と見なし得る周波数範囲の成分であるとする。

まず二本マイクロホンで出力される成分 P_M は騒音源による成分 P_{MS} と二次音源による成分 P_{MA} とより成るから

$$P_M = P_{MS} + P_{MA} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。二次音源 A の位置における進行波成分を P_P 、後退波成分を P_r とすれば式(1)は二本マイクロホンの間隔を Δl として

$$P_M = (1 + G_1 \cdot e^{-jkd\Delta l}) \cdot e^{jkl} \cdot P_P + (1 + G_1 \cdot e^{jkd\Delta l}) \cdot e^{-jkl} \cdot P_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。さて式(1)における P_{MA} がハウリングを発生させる成分となるからこの P_{MA} がどのような式で表されるかを求めてみる。式(1)と(2)より

$$P_{MA} = P_M - P_{MS} = (1 + G_1 \cdot e^{-jkd\Delta l}) \cdot e^{jkl} \cdot P_P + (1 + G_1 \cdot e^{jkd\Delta l}) \cdot e^{-jkl} \cdot (P_{rs} + P_{rA}) - P_{MS} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ただし P_{rs} は後退波成分 P_r の騒音源による

寄与成分であり、 P_{rA} は二次音源による寄与成分である。

さて進行波成分 P_P は音源による寄与成分 P_{PS} と二次音源による寄与成分 P_{PA} とから成るので P_{MS} は次式のように表される。

$$P_{MS} = P_{PS} \cdot e^{jkl} + P_{rs} \cdot e^{-jkl} + G_1 \cdot (P_{PS} e^{jk(l-\Delta l)} + P_{rs} e^{-jk(l-\Delta l)}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を式(3)へ代入することにより P_{MA} は以下のようになる。

$$P_{MA} = (1 + G_1 \cdot e^{-jkd\Delta l}) \cdot e^{jkl} \cdot (P_P - P_{PS}) + (1 + G_1 \cdot e^{jkd\Delta l}) \cdot e^{-jkl} \cdot P_{rA} = (1 + G_1 \cdot e^{-jkd\Delta l}) \cdot e^{jkl} \cdot P_{PA} + (1 + G_1 \cdot e^{jkd\Delta l}) \cdot e^{-jkl} \cdot P_{rA} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この式(5)が二本マイクロホンの出力 P_M に含まれる二次音源による寄与分 P_{MA} を表す式である。

ところで P_{PA} と P_{rA} は実際の実験では特定することができない。また $1 + G_1 e^{jkd\Delta l}$ と $1 + G_1 e^{-jkd\Delta l}$ は同時に零とはならないから式(5)を零とする条件は $P_{PA} = 0$ という仮定のもとで

$$G_1 = -e^{-jkd\Delta l} \quad \dots\dots\dots (6)$$

という伝達関数を G_1 に設定することにより満足させることができる。すなわちダクト系の音の反射成分のうち、 P_{PA} の成分が除かれれば、 G_1 には二本マイクロホンの間隔 Δl に相当する遅れを持たせて各々のマイクロホンの出力の差動出力を得れば良い。

4. 二次音源による進行波成分

P_{PA} に対する検討

3章から二次音源 A により生じる進行波成分 P_{PA} が無視できる構造であれば二本マイクロホンシステムで二次音源の成分を除けることがわかった。そこでこの P_{PA} がどのような経路で生じているかを以下に検討する。

図1 ハウリングの発生経路

図2 長いダクトの場合の音響成分

図3 反射成分を考慮した二本マイク法の構成

図4が二次音源からインパルス音を発生させたときの両端の音響インピーダンスの違いにより生じる反射波の経路を示した図である。ちなみに定常音を発生させた時にはこれらの成分の総和が観測されることになる。検知マイクの位置でそれぞれ進行波および後退波として観測される成分のうち、 $(P_{PA})_n$ および $(P_{rA})_n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) が二次音源から後退波として伝ばした成分により生じた反射成分である。同様に $(P_{PA})'_n$ および $(P_{rA})'_n$ は二次音源からは進行波として伝ばした成分により生じた反射成分である。図4よりわかるように $P_{PA}=0$ とするには左端での反射が生じない構造にする必要がある。そのためには図5のように吸音材等により音のエネルギーを吸収すれば良い。その時に検知用マイクで検知される二次音源の成分は図5において音源からの直接音 $(P_{rA})_1$ と右端出口で反射した成分 $(P_{rA})'_1$ である。

5. 二本マイク用に吸音処理したダクトの音響特性

5・1 理論解析 二本マイク法を適用するためにはダクトは図5のように吸音処理を施す必要のあることがわかった。このときの音圧成分は図5で示す $(P_{rA})_1$ と $(P_{rA})'_1$ の二つのみである。これらの成分によりダクトの音場がどのようなになるかを導く。

図6で示すダクトにおいて制御口(音の放射口)における反射係数を α とする。ここで α は正確には複素数

図4 反射波の経路

図5 音の放射口とは反対の面の反射を防止したときの反射成分

であるが対象周波数が低周波数であるので実数と仮定する。また制御スピーカー A を原点として左方向を $+x$ 方向とする。制御スピーカーから制御口までの距離を a とすると $x=-a$ における後退波成分 P'_a は

$$P'_a = e^{-jka} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ここで $k=\omega/C$ (C : 音速) で波数である。そしてこの位置における反射成分を P_{ra} とすると次式が成り立つ。

$$P_{ra} = \alpha P'_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがってマイク位置 x における音圧 P_x は

$$P_x = e^{-jkx} + \alpha e^{-jka} \cdot e^{-jk(x+a)} \\ = D \cdot e^{-j(kx-\phi)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$$D = \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos 2ka} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tan \phi = \frac{-\alpha \sin 2ka}{1 + \alpha \cos 2ka} \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。式(10)で表される振幅特性の概略図を図7に示す。振幅特性は α の正負によるが例えば開口端のように α が負の値をとるときには

$$f_{\max} = \frac{C}{4a} n \text{ Hz}, \quad (n=1, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (12)$$

の時に最大値 $1-\alpha$ を持ち、

$$f_{\min} = \frac{C}{2a} n \text{ Hz}, \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (13)$$

の時に最小値 $1+\alpha$ を持つ。

式(9)より以下のことがわかる。

(1) 音圧は周波数に依存した振幅特性を持った進行波状の特性を持っている。

図6 二本マイク用に吸音処理したダクト

図7 吸音処理したダクトの音圧振幅特性

(2) 周波数特性はあたかもダンピングの大きい共振点と反共振点を有しているように観測される。

(3) 式(10)で表される振幅は x に依存していないのでどこで測定しても同じ値になる。

(4) 最大値と最小値の周波数は制御スピーカーから音の放射口までの距離 a による。

5.2 実験との比較 上記で述べた点を実験により確認した。音の放射口とは反対の面の反射を防ぐために管内に吸音材を充てんした。二次音源からホワイトノイズ音を発生させて、検知マイク M との間の伝達関数からインパルス応答関数を求めたのが図8である。吸音処理によって図5で示されたような音源からの直接音成分と開口部における反射成分の二つのみが存在していることが確認できる。

次に二次音源を放射口から 0.25 m の位置に置いて、マイクの位置を変えたときに得られた伝達関数を図9の(a)と(b)に示す。マイク位置を変えても図中で示す最小値(反共振点状の周波数)および最大値はほとんど変化していないことがわかる。またその周波数は式(13)において

$$f_{\min} = \frac{330}{2 \times 0.25} \times 1 = 660 \text{ (Hz)}$$

となり、ほぼ実験値と一致する。

さらに二次音源の位置を 0.75 m に置いて、マイクの位置を変えたときの伝達関数を図10の(a)と(b)に示す。同様に反共振点状の周波数はマイク位置に依存していないことがわかる。その周波数も理論値とほぼ良い対応を示している。

6. シミュレーションによる

二本マイクロホン法の検討

式(5)より差動出力で構成される二本マイクロホン

図8 吸音処理の効果

法では P_{PA} の成分を除去しないと効果を得られないことがわかったが、そのことをシミュレーションにより確認した。

図11にシミュレーションの対象としたダクトを示す。左端は完全反射面として右端の開口部は音響インピーダンスとしてフランジ付きの円形孔の放射インピーダンスを仮定した。そして二次音源に相当するスピーカーからインパルス音を発生させた時の二本マイクロホンシステムの M_1 と M_2 の出力波形およびそれらの差動結果(O)を求めた。インパルス音は 0.010 0 秒から 0.010 2 秒に加えられたとした。また空間の伝達関数を強制力が入力された時の波動方程式を解くことで求めてこの伝達関数のインパルス応答関数と入力信号との間で畳み込み演算を実行して各マイクロホン出力の時間応答を得た。

(a) マイク位置が 0.5 m のとき

(b) マイク位置が 0.81 m のとき

図9 実験より求めた吸音処理ダクトの音響特性($a=0.25$ m)

このようにして得られた各マイクロホンの出力結果を図 12 に示す。(a) がマイク M_1 の出力で、検知された値に二本マイクロホンの間隔に相当する遅れ D を持たせた後の結果である。①が音源からの直接音、②が左端で反射された成分、③は①が右端で反射した成分であり、以下各端での反射に応じてインパルス成分が認められる。図 12(b) はマイク M_2 における出力であり、①、②、③の各成分は図 12(a) と対応している。そして図 12(c) がマイク M_1 とマイク M_2 の値の差動出力結果 O を示すものである。これより音源からの直接音①と左端からの反射音成分②は完全に除去されているが、他の成分は除去されていないことがわかる。

シミュレーション結果からも差動出力で構成される二本マイクロホン法の構成では一端を完全に吸音処理する必要のあることが明らかになった。

(a) マイク位置が 0.5 m のとき

(b) マイク位置が 1.19 m のとき

 図 10 実験より求めた吸音処理ダクトの音響特性($a=0.75$ m)

7. 実験による二本マイクロホン法の効果の検討

吸音処理の効果とその必要性を確認できたので、実際に二本マイクロホンシステムを構築して実験によりその効果を検討した。

図 13 が構築した二本マイクロホンシステムである。二本マイクの間隔に相当する遅れと差動出力信号を求める部分は DSP(Digital Signal Processor) を用いてデジタルで信号処理をした。システムのサンプリング周波数は 8 kHz であり DSP で構成した FIR (Finite Impulse Response) デジタルフィルタのタ

図 11 シミュレーション用のダクト

 (a) マイク出力信号 M_1

 (b) マイク出力信号 M_2

 (c) 差動器の出力信号 O

図 12 二本マイクのシミュレーション結果

図13 実験に用いたダクト

(a) 吸音材を充填したとき

(b) 吸音材を充填しないとき

図14 インパルス応答の比較による二本マイク法の効果

ップ数は256である。そして図8と同様にして二次音源に相当するスピーカーにホワイトノイズ信号を入力して二本マイクロホンシステムの出力和との間の伝達関数からインパルス応答関数を求めて反射波成分を同定した。

図14(a)が左端部分に吸音材を充填したときの二本マイク出力のインパルス応答関数であり、図14(b)が左端に吸音材を充填しなかった時のインパルス応答関数である。吸音材のある(a)のインパルス応答関数ではほとんど反射成分が認められず、二本マイクロホンシステムによって二次音源からの成分が除去されたことは明らかである。一方、吸音材のない(b)のインパルス応答関数では先頭部分における音源からの直接音と右端の反射波成分は(a)と同様に除去されているが、残りの反射波成分はシミュレーション結果と同様に全く除去されていないことがわかる。

インパルス応答関数からみた二本マイクロホンシステムの効果を確認できたので実際に二本マイクロホンシステムから得られる出力を図15に示した。図15(a)が左端を吸音処理したとき、(b)が左端を吸音処理しないときの時間出力応答である。それぞれの図

(a) 吸音処理のあるとき

(b) 吸音処理のないとき

図15 時間波形の比較による二本マイク法の効果

で上の波形が二本マイクロホンのうちの M_1 の出力であり、下の波形が二本マイクロホンの出力 O である。図15(a)からはマイク M_1 の出力に比して二本マイクロホンの出力 O は十分に低減されており二次音源からの成分の除去効果を確認することができる。一方図15(b)では低減効果が認められておらず、二次音源からの成分を除去できないことが明らかになった。

8. 結 言

ダクト音のような一次元音場のアクティブノイズコントロールにおけるハウリングの除去のための検討をした。両端の反射成分を考慮した二本マイク法のシステムを理論検討した結果、音の放出口とは反対側の開口部(面)における反射成分が生じないという条件のもとでは二本マイクの間隔に相当する遅れを有した差動出力を得ればよいことがわかった。そして実験により二次音源からの成分の低減効果を確認した。

文 献

- (1) 林・鈴木(成)・長安・鈴木(健)・猿田・田村, 能動制御による消音(第1報, ダクト構造に対するFIRフィルタシステムのモデル化), 機論, 57-534, C(1991), 426-430.
- (2) 鈴木(成)・林・長安・猿田・田村, 能動制御による消音(第2報, 適応制御システムの検討), 文献(1)の431-436ページ.
- (3) 赤松・西村・泉出, ダクト出口放射音のアクティブコントロール, 三菱重工技報, 23-6(1986), 92-97.