2音源を用いた能動的音響制御のためのハウリング抑制手法*

雫 本 信 哉^{*1}, 田 中 英 雄^{*2}
金 光 陽 一^{*1}, 松 田 浩 一^{*1}

Howling Cancellation for Active Noise Control with Two Sound Sources

Shinya KIJIMOTO^{*3}, Hideo TANAKA,
Yoichi KANEMITSU and Koichi MATSUDA

^{*3}Department of Intelligent Machinery and Systems, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

In the active noise control, a transfer characteristics of an acoustic feedback path has a considerable influence on the stability of the control system. When an acoustic system has a feedback path, the control system often causes unstable behavior called howling. An approach to prevent the howling named directional control sound source (DCSS) is investigated and compared with an ordinary approach (howling canceller) in this paper. This DSCC is composed of two sound sources and a finite impulse response (FIR) filter. Active noise control using the filtered-x LMS (Least-Mean-Square) algorithm is carried out in an L-formed duct model. It is shown that the DCSS approaches prevented the howling effectively through the experiment.

Key Words: Noise Control, Adaptive Control, Filter, Howling, Directional Control Sound Source, Howling Canceller, Filtered-x LMS Algorithm

1. 緒言

日常生活に於いて静粛な環境を望む声が年々高まっている中、騒音に関する苦情は公害全般の苦情のうちで最も多数を占めている⁽¹⁾。身の回りには騒音源となるものが多数存在し、日常生活に与える影響も大きい。従って騒音対策、つまり音響制御に寄せられる期待は非常に高いものがある。

現在行われている音響制御は、吸音、遮音等を用いた受動的音響制御と、デジタル信号処理技術を用いた能動的音響制御(Active Noise Control; ANC)の2つに大きく分類できる。

本研究では、理論的にある程度確立されている1次元音場での能動的音響制御を行う際に、実用上問題となるハウリングを抑制することに着目する。ハウリングを抑制しながら安定した音響制御を行う方法として、2つの制御音源から構成される指向性制御音源(Directional Control Sound Source; DCSS)⁽²⁾を提案し、その効果を実験によって確認する。また従来の手法であるハウリ

ングキャンセラによる方法と比較・検討する。文献(2)において著者らは指向性制御音源について実験を行い、ある程度の効果を確認しているが、本論文では、さらに詳細に検討を行い、その効果を明らかにする。

複数の制御音源を用いたハウリングの抑制手法に関する従来の研究として古くは1970年代のSwinbanks⁽³⁾による理論的研究および、これを実験的に検証したPooleとLeventhallによるもの⁽⁴⁾などがある。これらの先駆的な研究は、アナログ技術によって実現されており、音源間、音源とマイクロホンの間の音響特性はいずれも、距離による時間遅れのみを考慮したものである。その後もハウリングの抑制に関する研究は、いくつか行われている^{(5)~(8)}が、複数のセンサを用いてハウリングを抑制するものが多く、複数の音源によってハウリングを抑制するものはあまり見られない。また、音響特性を距離による時間遅れと仮定した研究が多く、本論文のように、実際の音響特性を用いた研究はあまり行われていないようである。実際のダクトなどでは、ダクト開口端からの反射の影響などによって、音響特性を単純な時間遅れでは近似できない場合が多く、実際の音響特性を用いることで、このような場合にも対応できる。

* 原稿受付 2000年4月17日。

^{*1} 正員, 九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*2} キヤノン(株)宇都宮光学機器事業所(〒321-3292 宇都宮市清原工業団地20-2)。

E-mail: kiji@mech.kyushu-u.ac.jp

2. 一次元音場の能動的音響制御

ANCの最も簡単な適用例として1次元音場への適用が挙げられる。1次元音場の具体例としては、音響制御の対象とする周波数帯域において音の伝播が平面波とみなすことができるダクト内の音場が挙げられる。本研究では、このような音場を対象とし、これを1次元ダクトと呼ぶこととする。

1次元ダクトのフィードフォワード制御によるANCの概略図を図1に示す。図に示すように、入射騒音を制御系へ取り込む参照マイク、制御後の誤差を取り込む誤差マイク、騒音に対する制御音を出力する制御音源をダクト内に配置し、制御系にDSPを用いて音響制御を行う。通常、制御誤差を誤差マイクにて測定し、参照マイクからの入力信号とともに制御系フィルタ C の逐次特性更新のパラメータとして使用するLMS (Least-Mean-Square) アルゴリズム⁽⁹⁾による適応制御が主流である。

1次元ANCの実用上の問題点として注意しなければならないのは、ハウリングの発生である。ここでハウリングとは、図1に示すように、制御音源から発生させ

Fig. 1 Active noise control in 1-dimentional sound field

Fig. 2 Active noise control with howling canceller

た制御音がフィードバック経路 H を経由して参照マイクによって再検出され、その信号が、再び制御系 C に入力されることにより音響系および制御系によって閉ループが構成されるため制御系が不安定となり発散してしまう現象のことである。

3. ハウリングの抑制法

3.1 ハウリングキャンセラ 一般的なハウリング抑制方法として、ハウリングキャンセラを用いる方法について図2に示す。この方法は、あらかじめ求めた制御音源から参照マイクへのフィードバック経路 H の特性を、DSP内に実現し、制御系の内部でフィードバック経路の影響を相殺するものである。本方法は、基本的なANC(図1)に制御系内部でソフトウェア的に実現される特性 F を加えるのみでよく、新たにマイク、スピーカといった制御要素を付け加える必要がないという構成の簡単な点が利点である。

3.2 指向性制御音源 著者らが提案している指向性制御音源は、2つの制御音源を用いたハウリングの抑制手法である。指向性制御音源によるシステムの構成を図3に示す。先ほどの1次元ダクトANC(図1)における1つの制御音源の代わりに、2つの制御音源、およびその音源の間に挿入するフィルタ D によって構成される。なお、図3において H_1 は制御音源1から参照マイクまでの音響伝達特性を、 H_2 は制御音源2から制御音源1までの音響伝達特性をあらわしている。

制御系の出力信号を y 、制御音源の電気音響変換特性を A とすると、参照マイクがある地点における音圧 P は、2つの音源によって出力された音の重ね合わせとして、以下のようにあらわされる。

$$P = (H_1 H_2 A)y + (H_1 A D)y \dots \dots \dots (1)$$

ハウリングを防止するためには、2つの制御音源からの音が参照マイク地点において0になればよいので、 $P=0$ とすると、式(1)より D は

$$D = -H_2 \dots \dots \dots (2)$$

とあらわすことができる。本システムを用いたANCにおいては、あらかじめ上式の特性を求め、DSP内に D をFIRフィルタの形で実現して音響制御を行うことになる。本方法の利点は、 D で近似すべき特性 H_2 は、2つの制御音源の短い距離間の音響特性のみであり、音源、マイク等の特性が含まれないため、時間遅れが少なく、簡潔で、有限長のFIRフィルタであらわすのに適した特性になると考えられる点にある。

4. 実験

4.1 実験装置 本研究では、1次元ダクトとして、直径20cm 両端開口のL字型ダクトを使用する。図4に実験装置の全体の構成図、図5に実験装置を示す。図4において、2つの制御音源間の距離 d は0.5mから0.35mのあいだで変化させ、制御効果に与える影響を調べる。

4.2 実験方法 実験は、表1に示す条件で行った。まず、ハウリング抑制のための対策をなにもとらなかった場合の制御経過を図6に示す。図は、横軸に制御開始

Fig. 3 Active noise control with DCSS system

Fig. 4 L-formed duct and the control system

Fig. 5 Experimental setup

からの時間を、縦軸に誤差マイクの出力電圧を示している。制御開始後30秒以降ハウリングによって急激に発散してしまっており、ハウリング抑制のために何らかの対策が必要であることがわかる。

ハウリングキャンセラおよび指向性制御音源を用いた場合の実験装置の構成をそれぞれ図7および図8に示す。ハウリングキャンセラを用いる場合は、2つの制御音源のうち下流側の音源2のみを使用し、制御音源1は使用しない。この方法では、ダクト内部の音響特性のうち、フィードバック経路にあたる H (制御音源および参照マイク等の特性を含む)をあらかじめ求め、DSP内の特性 F として実現する必要がある。また特性 E は誤差特性と呼ばれる特性であり、制御系フィルタ C の出力 y から誤差信号 e までの経路の特性のことである。誤差特性 E は、ハウリングキャンセラにおいては、図7の音響特性 G (制御音源および誤差マイク等の特性を含む)に相当し、制御音源の特性を A 、誤差マイクの特性を M とすれば、

$$E = MGA \quad (3)$$

とあらわされる。また、指向性制御音源においては、図8の特性 D および音響特性 G_2, G_1 によって決まる特性(制御音源および誤差マイク等の特性を含む)であり、

$$E = MG_1(G_2AD + A) \quad (4)$$

である。

本研究では、特性 F および誤差特性 E は、LMSアルゴリズムを用いた適応同定によってあらかじめ実験的

Table 1 Condition of experiment

Frequency range		100 ~ 500Hz
Sampling frequency		1500Hz
Filter length	D, F	100
	E	90
	C	125

Fig. 6 Result of ANC without any howling reduction system

に求めておき、制御時に DSP 内部に FIR フィルタとして実現する。適応同定を用いる利点としては、同定のために測定装置などの新たな機器を必要とせず、ソフトウェアの構成も、制御時と同定時ではほぼ同様であるため、特性 F および誤差特性 E を求めるための新たなコストがほとんど不要であるということがあげられる。

指向性制御音源の特性 D はハウリング抑制のため 2 つの制御音源と共に必要な特性であり、式 (2) であらわされる。 D および E は共にハウリングキャンセラの場合と同様に制御前にあらかじめ適応同定によって求める。

4.3 実験結果 それぞれの制御結果を図 9 および図 10 に示す。共に制御開始後約 150 秒経過した後に誤差マイクで測定された制御結果を周波数分析したものである。両者共に、ハウリングを抑制し、効果的に制御が行われていることが分かる。図 11 は両者の制御効果を比較したものである。図の縦軸は各周波数における制御前、制御後の音圧の変化、すなわち消音量の大きさをあらわすもので、Sound reduction level(SRL)と呼

ぶことにする。 SRL は以下の式で求められる。

$$SRL = 20 \log_{10}(P_0/P) \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) において、 P_0 , P はそれぞれ、制御前、制御後の音圧 (単位 Pa) をあらわしている。図より、ハウリングキャンセラを用いると、350~400Hz の周波数帯域で若干ではあるが指向性制御音源の結果を上回っていることがわかる。しかし、全体的な制御効果でみると、指向性制御音源の結果が、170Hz 付近での 30dB 以上の制御効果をはじめとして、いくつかの周波数帯域で 20dB 程度の効果を確認できるのに対して、ハウリングキャンセラでは、17dB 程度が最大であることからわかるように、指向性制御音源の方が優れていることが確認できる。

この理由を考察するために、ハウリングキャンセラのフィルタ F と指向性制御音源のフィルタ D を比較する。図 12 および図 13 にそれぞれのフィルタ係数を示す。こ

Fig. 7 Howling canceller

Fig. 9 Result of ANC with howling canceller

Fig. 8 DCSS system

Fig. 10 Result of ANC with DCSS system

これらの図から分かるように、指向性制御音源のフィルタ D が、フィルタ長100の範囲で、一様に収束する比較的簡単な特性であるのに対して、ハウリングキャンセラのフィルタ F では、先頭に値がほぼ0の遅れ部分があること、および、一度収束した係数が、途中で再び大きくなり、フィルタ長100の範囲できれいに収束していないことが確認できる。これは、フィルタ F として同定すべき特性が、制御音源から参照マイクまでの比較的長い部分の特性であること、および、制御音源、参照マイク、といった電気音響変換機器の特性までもも含んでいることから、その特性が複雑になるためと考えられる。実際に、図12に示したフィルタ係数の最初の部分の時間遅れは、制御音源から参照マイクまでの音響経路の遅れに相当することを確認している。一方、指向性制御音源の特性 D は、式(2)であらわされることから分かるように、2つの制御音源の特性が等しければ、音響

Fig. 11 Comparison of two methods

Fig. 12 Filter Coefficient of F (Howling canceller) Fig. 13 Filter Coefficient of D (DCSS)

経路のみの特性 H_2 に一致するため、図13のように単純な形で表現できる。このため、有限長の FIR フィルタによって表現した場合の誤差が、フィルタ F の方がフィルタ D よりも大きくなってしまい、これが、制御効果の違いとしてあらわれているものと考えられる。

4.4 音源配置による制御効果の変化 指向性制御音源において、音源間の距離が制御効果に与える影響について検討する。2つの制御音源間の距離 d (図4参照) を変化させ、最適な制御効果が得られる配置を見つけることを目的とする。

d が 0.35m, 0.40m, 0.45m, 0.50m におけるそれぞれの制御結果を図14に示す。高周波数帯域において消音効果の差が顕著にあらわれている。特に 350Hz 付近のピー

Fig. 14 Result of ANC with different d

クにおいては、 $d=0.35\text{m}$ においては約20dBの消音効果が確認できるのに対し、 $d=0.50\text{m}$ ではほとんど効果が得られていない。一方、低周波数帯域においては、 d が大きい方が若干高い消音効果が得られていることが確認できる。従って、制御の目的に合わせて d を適切に設定する必要がある。例えば、ある程度広い周波数帯域での音響制御を目的とする場合には、指向性制御音源の2音源間の距離を小さくすることが有効であることが考えられる。

最後に、誤差マイク以外の測定点における消音効果について検討する。測定点はダクトの出口より外部へ10cmの地点である。図15に $d=0.35\text{m}$ の場合のダクト内およびダクト外の消音量(SRL)の比較を示す。低周波数帯域ではほぼ誤差マイクでの結果と同様の制御効果が得られていることが確認できる。高周波数帯域においては、制御音の少しの位相のずれが消音効果に大きく影響するためか、一部であまり高い効果が得られていない。

5. 結言

本研究では、1次元ダクトの能動的音響制御の際問題となるハウリングに着目し、そのハウリングを抑制しながら安定した音響制御を行うシステムとして2つの制御音源を用いる指向性制御音源を提案し、従来のハウリング抑制手法であるハウリングキャンセラと、その制御効果を比較した。

また、制御の際には、FFT等の外部の解析装置を使用せずに、DSP、ホストコンピュータ、及びマイク、スピーカを用いて、制御の前にあらかじめ必要な特性を同定し、制御時にはハウリングを抑制しながら安定した能動的音響制御を行う方法を示した。

Fig. 15 Sound reduction level detected by Internal or External microphone

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 2つの制御音源を用いた指向性制御音源によって、ハウリングを抑制し、安定した能動的音響制御が可能であることを確認した。
2. 実験の結果、100Hz~500Hzの制御対象周波数範囲において最大で約30dBの消音効果が得られることを確認した。
3. 従来の手法であるハウリングキャンセラとの比較実験において、指向性制御音源を用いることで低周波数帯域でより高い消音効果を得ることが出来ることを確認した。
4. 2制御音源間の距離の変化に伴う制御効果の変化について検討した結果、制御音源間の距離を短くすると、広い周波数帯域で効果があり、また、音源間の距離を長くすると、低周波数帯域での制御効果が高くなることがわかった。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金(奨励研究(A), 課題番号10750172)の助成を受けた。

参考文献

- (1) 公害防止の技術と法規編集委員会編, “公害防止の技術と法規, 騒音編”, 産業環境管理協会, 1995
- (2) 雄本・金光・松田・下嶋・木戸岡, “能動的音響制御におけるハウリング抑制手法”, 日本機械学会第74期通常総会講演論文集(I), 97-1, 703-704, 1997
- (3) M. A. Swinbanks, “The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts”, *Journal of Sound and Vibration*, 27(3), 411-436, 1973
- (4) J. H. B. Poole and H. G. Leventhall, “An Experimental Study of Swinbanks' Method of Active Attenuation of Sound in Ducts”, *Journal of Sound and Vibration*, 49(2), 257-266, 1976
- (5) Minoru Takahashi ほか5名, “Broadband active sound control system for air-conditioning duct noise”, *Journal of Acoustical Society of Japan (E)*, 8, 6, 263-269, 1987
- (6) 西村正治, 新井隆範, “ダクト出口放射音のアクティブコントロール”, *日本音響学会誌*, 45, 9, 672-680, 1989
- (7) 鈴木成一郎, 林卓郎, “アクティブノイズコントロールにおけるハウリングキャンセラの効果に対する考察”, *機論*, 59-565C, 2682-2687, 1993
- (8) L. Blondel, P. Meunier, C. Couvreur and P. Chapelle, “Reduction of Feedback-Caused Instability of Active Noise Control Systems”, *Proc. of Inter Noise 94*, vol. 2, 1393-1396, 1994
- (9) 長松昭男他 編著, “音・振動のモード解析と制御”, 日本音響学会編, 音響テクノロジーシリーズ2, コロナ社, 1996