

1. アクティブコントロール技術とは

東京電機大学 浜田 晴夫

☆ はじめに

本特集では騒音および振動のアクティブコントロール (Active Control of Noise and Vibration; 以下 ANC or AVC と略す) の原理や応用技術を解説する。ANC とは、従来の吸音現象、共鳴現象などを利用したいわゆる受動的な消音技術ではなく、基本的には、騒音に対して別の音波 (2 次音源) を作り、音波干渉によって結果的に騒音を低減させようとする技術である^{1), 2), 12)}。ANC の研究の歴史は古いが、ごく最近まで実用に供するには至らなかった。しかしながら、いろいろな応用分野で今また再び注目を集めるようになってきた。この背景には、エレクトロニクス技術、特にデジタル信号処理技術の発展によってこの技術を現実のものとする可能性が急速に高まってきたこと^{3) ~ 6)}、さらに、吸音材などを用いる受動的な騒音技術では困難な特に低域 (おおよそ 500Hz 以下) での高い消音効果が期待されることなどである^{1), 2), 9)}。これらが現実のいろいろな応用に対して魅力的な特徴となっている。

さて、本特集は次のように構成されている。

(ANC を概観する)

まず、本稿では ANC を概観しその原理を理解していただくことに主眼をおいた。そのために、どのように制御するかという制御方式の観点からいくつかの基本的な原理を解説する。これにより、後述のいろいろな応用の解説のなかで、ここで述べる原理がどのように活用されているかが明確になることを期待する。

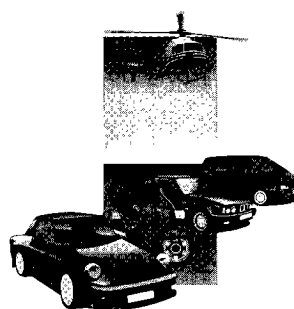
(ANC の応用)

ANC の応用としては、3 つの分野を解説してある。1 つは、コンサートホールなどの空調ダクトシステムへ ANC を適用した例である。原理的には 1 次元音響伝搬を対象とすることが多いため、最も古くから研究が行われていた分野であり、また、いち早く実用化が行われた分野でもある。しかしながら、流れを伴う騒音であることもあり、実用のためにはロバスト性などさまざまな問題を解決する必要があることも事実である。大口径ダク

トへの適用など今後もさらなる発展が期待される分野である。他の 2 つの応用は、最近着目されている遮音壁への適用と閉空間での応用である。遮音壁への応用は、障壁を回折して伝搬する特に低周波音に対する大きな減衰を期待した研究であり、我が国のいくつかの機関で研究が行われている。ロバストで高速追従性のある制御アルゴリズムの開発、移動音源への対応と研究分野としてもさまざまな話題を提供している。一方、3 次元音場としての閉空間での応用では、プーミングノイズ (こもり音) やロードノイズなどの車室内騒音の制御の他、飛行機や新幹線の座席シートに適用した例が有名である。これらは、いずれも複数のセンサとラウドスピーカを用いたマルチチャネルによるフィードフォワード制御 (本稿で解説) によって実現されている。また、イヤードیفエンダと称されるヘッドホンを用いた ANC も重要な応用分野である。飛行機コックピット内の騒音レベルは相当なものであるが、パイロットを騒音から守り、スムーズな通信を支えるのに ANC が利用されている。このイヤードیفエンダの制御は、本稿で述べるフィードバック制御が主流である。

(振動を抑える)

本特集では、ANC と密接に関係する AVC (Active Vibration Control) に関しても原理と応用を分かりやすく解説していただいた。音の制御ではフィードフォワード制御が多用されているのに対して、振動制御ではフィードバック制御が主体である。AVC の導入例なども、ANC のそれと比較してお読みいただければ双方の特徴がより明確になるものと思われる。



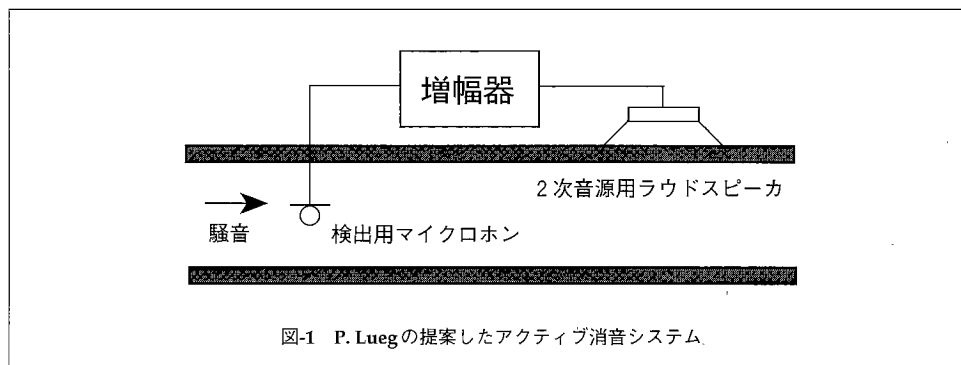


図-1 P. Luegの提案したアクティブ消音システム

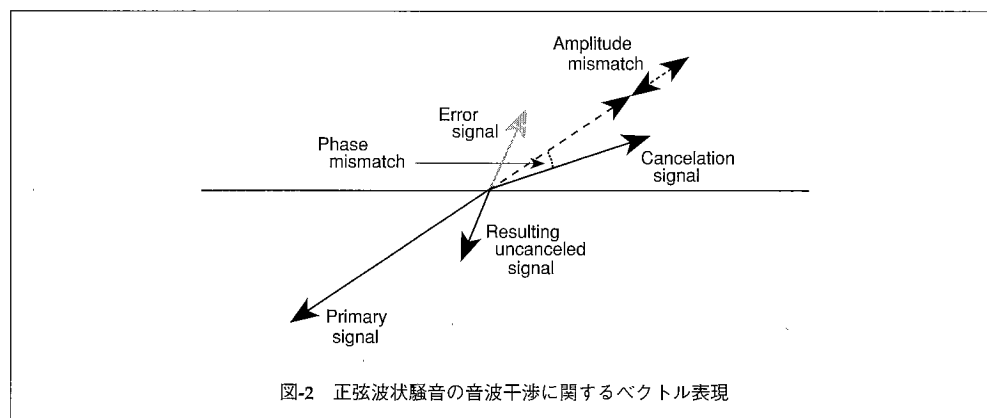


図-2 正弦波状騒音の音波干渉に関するベクトル表現

（音を操る）

オーディオ再生のための音場制御も広義の意味では、音のアクティブコントロールであると考えられる。ただ、所望の信号の与え方、帯域などが異なるために、たとえば、トランスオーラルシステムと称される再生方式では、スピーカ再生ではあるが、空間の局所領域、すなわち両耳の2点の音圧を制御点とするなどして広帯域化を行っている。最近、人頭の近傍での制御効果をシミュレーションによっても正確に把握できるようになってきた。これらの技術はANCの分野でも有効に生かされる技術である。以上の各解説を通してお読みになることで、読者のこの分野の技術に対するよりよい理解の一助になれば望外の喜びである。

☆ 制御方式の概要

現在、ANCを実現するための基本的な制御方式として次のようなものが研究あるいは実用化されている。

- (1) フィードフォワード制御方式
- (2) フィードバック制御方式
- (3) 現代制御理論に基づく制御方式
- (4) 適応予測制御方式

それぞれの制御方式に関して、単一チャネル制御、マルチチャネル制御が考えられ、また、評価対象となる物理量としては、音圧の二乗平均を規範として採用する場

合が多いが、一部、目的によっては、音響インテンシティ、振動加速度など他の物理量を対象とする場合もある。

☆ フィードフォワード制御方式

フィードフォワード制御方式は、現在最も実用化が行われている方式であり、消音の対象となる2次音場における騒音とコヒーレントなリファレンス信号（通常、騒音のもとになっている1次音場で検出する）が得られる場合には非常に有効な方式である。空調ダクト騒音⁷⁾の場合の消音ダクト上流側で検出される信号や、自動車室内のこもり音（booming noise）の消音に用いられているエンジン回転に同期した正弦波状信号などがリファレンス信号の例である^{8), 10)}。

図-1はマイクロホン、増幅器、およびラウドスピーカからなるダクト系の単一チャネルシステムであり、最初の提案であったP. Lueg（1936）の特許出願もこれと同等なものであった（ANCシステムでは、このように入力センサ、コントローラ、アクチュエータ（ラウドスピーカ）の3つの基本エレメントが重要である）。まず、動作原理としてはじめに強調しなければならない点は、空気中の音波の伝搬速度が電気信号の速度よりも遥かに遅いという事実である。すなわち、音波が検出される場所（ダクト上流側のマイクロホン位置）から下流側に伝

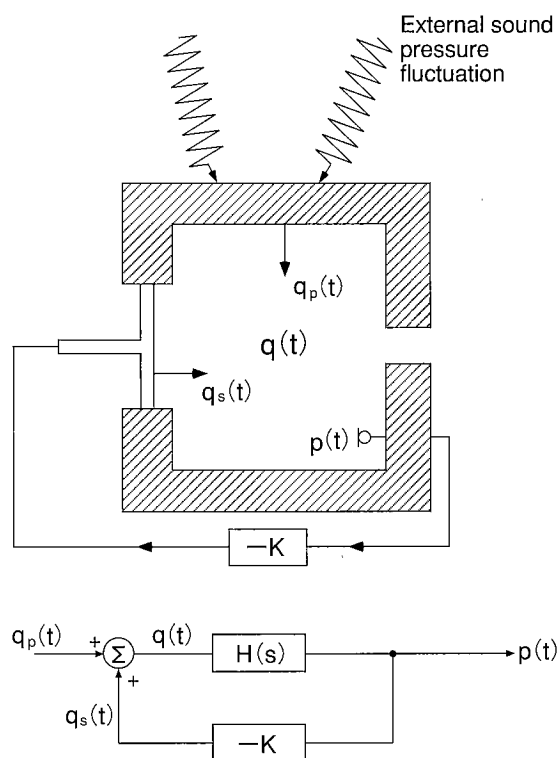


図-3 耳覆い型イヤプロテクタ内キャビティを模擬した簡単な物理モデル（ピストン音源で駆動され、剛壁によって囲まれている）

搬して、消音が行われる場所に到達するまでに要する時間の勝負である。この時間内に、マイクロホンで収音した騒音サンプルを電子回路で処理し、伝搬音と同振幅、逆位相の2次音（付加音）をラウドスピーカから発生させる必要がある。さて、下流側に伝搬してきた騒音と2次音との干渉現象を考えてみよう。P. Luegのシステムの場合、信号の処理は単に増幅器のみで構成されているため、もし騒音が定常な単一周波数の場合で、2次音を発生させるラウドスピーカの配置場所が騒音に対して180度の位相反転を引き起こす時間遅延を与える場所になっているときに、いわゆる、破壊的な音波干渉が起こる。

ここで重要なことは、2次音の精度である。対象としている音が正弦波の場合、回転するベクトルで考えると分かりやすい。現実には、2次音を騒音である1次音と正確に同振幅、逆位相にすることは困難で、図-2に示すように、振幅、位相のミスマッチを生じる。たとえば、20dBの騒音の減衰を得たいとすると、たとえ同振幅の場合でも許容される位相のミスマッチは4.7度以内に抑える必要があり、また、同様に同位相の場合でも、振幅のミスマッチは0.9dB以内に抑え込む必要がある。いわんや所望減衰30dBに対しては、それぞれ2.8度以内、0.28dB以内の高精度が要求される。これはアナログ処

理では大変困難な技術であるが、後述するように近年のLSI技術に支えられたデジタル信号処理の発達はこの現実のものとした。また、正弦波状の騒音ではなく、複雑な波形の場合でも、それを構成するすべての周波数成分の位相とそれぞれ逆位相にすれば広帯域な騒音制御が可能である。もし、動作環境が定常で、マイクロホン、ラウドスピーカなどすべての構成要素の特性が線形で時不変なものであれば、最適なコントローラの特性はただ1つの固定したものに定まるかもしれない。しかしながら、音響系では温度などの環境変化、経時変化などで伝達系の特性が変化しやすいため、時間の経過に伴って最適なコントローラの特性もそれら諸変動に追従して最適化していく必要がある。そこで、高精度を保ちながらも適応的に制御を行う必要から、適応フィルタを用いた制御技術がアクティブ消音に応用されるに至った。これは、アクティブ消音を実用の域に達成させるために必須の技術といえよう。

★ フィードバック制御方式

フィードバック制御方式については、安定なコントローラを実現するための、物理音響的な条件の制約のため、主に、小さなキャビティ内のアクティブ制御、すなわち、イヤードیفエンダなどに代表される密閉形イヤホンによる局所空間内での制御やダクト内音場制御などに利用されている。機械系のアクティブ制御でフィードバック制御が多用されるのと対照的である。ここでは、イヤードیفエンダを例にその動作原理、実現上の問題点などについて述べる^{11), 13) ~ 15)}。

単純なモデルを用いてイヤプロテクタにおけるフィードバック制御の原理をみてみよう¹²⁾。図-3に示すような、耳覆い型イヤプロテクタ内キャビティを模擬した簡単な物理モデル（ピストン音源で駆動され、剛壁によって囲まれている）を考える。

このキャビティには、小さな空気抜け用の穴が開いている。さて、このシステムは、次の常微分方程式によって記述できる。

$$C_a \frac{dp(t)}{dt} + \frac{1}{R_a} p(t) = q(t) \quad (1)$$

ここで $p(t)$ はキャビティ内の音圧であり、ピストンによってキャビティに起こる volume flow $q(t)$ の結果生ずるものである。 C_a はキャビティの音響コンプライアンスであり、キャビティ内体積を V_0 として $V_0 / \rho_0 c_0^2$ で与えられる。また、小穴は周波数に無関係な音響抵抗として働き、 R_a で表現されている。キャビティ内に与えられた volume flow $q(t)$ を入力とし、結果として生じる音圧 $p(t)$ を出力とみなす伝達関数 $H(s)$ は式 (1) のラプラス変換から次式となる。

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{R_a}{1 + sR_a C_a} \quad (2)$$

式(2)は入力信号に対する制限はなにも加えていないので、周期波形だけではなく、まったくランダムな入力信号(すなわち騒音)であっても成立することに注意する。また、フィードバック制御の結果、式(2)の伝達関数がどのようなになるかをみれば、その効果を算定できる。ここでは、理想的なセンサとアクチュエータを想定し、次のような関係を満足する2次音源(制御用音源)を考える。

$$q_s(t) = -Kp(t) \quad (3)$$

すなわち、ここで想定しているフィードバック制御は、キャビティ内の音圧に瞬時に反応し、その音圧に反比例したvolume flow(これもまた瞬時に)を作り出すような制御である。この制御を導入した結果、式(1)の常微分方程式によるシステムの記述は次式ようになる。

$$C_a \frac{dp(t)}{dt} + \frac{1}{R_a} p(t) = q_p(t) + q_s(t) \quad (4)$$

式(3)の q_s を式(4)に代入し整理すると次式となる。

$$C_a \frac{dp(t)}{dt} + \left(\frac{1}{R_a} + K \right) p(t) = q_p(t) \quad (5)$$

ここで、下式のように新しく音響抵抗 $\mathcal{R}_a$ を

$$\mathcal{R}_a \equiv R_a / (1 + KR_a) \quad (6)$$

として定義することで、式(2)に対応する新しい等価伝達関数を次式のように表現できる。

$$H_{\text{new}}(s) = \frac{P(s)}{Q_p(s)} = \frac{\mathcal{R}_a}{1 + s\mathcal{R}_a C_a} \quad (7)$$

したがって、式(2)、式(7)より、式(7)の $\mathcal{R}_a$ はフィードバック制御を導入したために修正された新しい等価音響抵抗であるとみることができる。この音響抵抗 $\mathcal{R}_a$ は、フィードバックループのゲイン K を大きくしていくと次のようになる。

$$\mathcal{R}_a \Big|_{KR_a \gg 1} = \frac{R_a}{(1 + KR_a)} \Big|_{KR_a \gg 1} \approx (1/K) \quad (8)$$

すなわち、ゲイン K を大きくしていくことは、大変小さな音響抵抗を持つ小穴に等価的に変換していることになる。物理的には、外部からの音の到来で生じたキャビティ内の音圧変化(圧力変化)が、2次音源であるピストンの瞬時の押し引き動作で相殺されるように働くことを意味している。このことは、式(7)を評価すれば明らかのように、伝達関数 $H_{\text{new}}(s)$ の振幅も小さくなっていくことに対応する。

☆ むすび

アクティブノイズコントロールの基本的な考え方について、特に制御アルゴリズムの観点から議論した。後述のさまざまな応用に関する解説にあるように、それぞれのアプリケーションの特徴を十分考慮し、また、さまざまな実用上の問題を乗り越える必要があるため、最適なアルゴリズムの選択・開発は今後ともますます重要になっていくものと思われる。さらに、アクティブコントロールに必要な構成要素、すなわち、センサ、アクチュエータに関しても同様のことがいえる。さらなる発展が実用化を加速することは明らかであろう。また、実用にあたっては、アクティブコントロールは万能ではなく、特に波長に起因する物理的な制約条件のため、従来の騒音対策技術と相補する技術であるという認識を持つことは重要であろう。そのため、両者の特徴を十分活かした新しい騒音対策技術の基盤を作ることが今後の重要な課題である。

参考文献

- 1) 浜田晴夫: 騒音のアクティブコントロールに関する現状と課題, 電音研資料, EA88-25 (1988).
- 2) 城戸健一: 騒音のアクティブ制御, 音響学会誌47, 661-667 (1991).
- 3) 浜田晴夫: アダプティブフィルタの基礎(その1), (その2), 音響学会誌45, 624-630, 731-738 (1989).
- 4) Elliott, S. J.: Electron. Lett., Vol.21, pp.979-981 (1985).
- 5) Hamada, H.: Signal Processing for Active Control, Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp., Active Control of Sound and Vibration, pp.40-51 (1991).
- 6) Elliott, S. J.: Letter to the Editor of Journal of Sound and Vibration 120 (1), pp.183-189 (1988).
- 7) Takahashi, M. et al.: Broadband Active Noise Control of Air-conditioning Duct Systems in Auditoriums, Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp., Active Control of Sound and Vibration, pp.273-278 (1991).
- 8) Nishimura, M.: Some Problem of Active Noise Control for Practical use, Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp., Active Control of Sound and Vibration, pp.157-164 (1991).
- 9) Nelson, P. A. and Elliott, S. J.: Active Noise Control: A Tutorial Review, Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp., Active Control of Sound and Vibration, pp.45-74 (1991).
- 10) Elliott, S. J. et al.: In-flight Experiments on the Active Control of Propeller-induced Cabin Noise, J. Sound. Vib.140, 219-238 (1990).
- 11) Hesse, T.: Commercial Considerations for the Implementation of Active Noise and Vibration Control, Proc. 1991 Acoust. Soc. Jpn. Int. Symp., Active Control of Sound and Vibration, pp.201-206 (1991).
- 12) Nelson, P. A. and Elliott, S. J.: Active Control of Sound, Academic Press (1992).
- 13) Bartles, V.: Headset with Active Noise-reduction System for Mobile Application, J. Audio Eng. Soc., Vol.40, No.4, pp.277-281 (1992).
- 14) Bose et al.: Headphoning, United States Patent, No.4455675 (June 19, 1984).
- 15) Denenberg, J. N.: Anti-Noise, Quieting the Environment with Active Noise Cancellation Technology, IEEE Potentials, Vol.11, No.2, pp.36-40 (Apr. 1992).

(平成10年11月27日受付)

