

特集: 静かで快適な生活を求めて

—最近のアクティブコントロール技術—

—編集にあたって—

東京電機大学

浜田 晴夫

音をもつて音を制す新しい騒音低減技術

本号は、最近話題となっているアクティブコントロール（Active Control）技術に関する特集であり、その考え方や応用分野、さらに、最近の動向に至るまでをやさしく解説してある。この特集が組まれた背景には、さまざまな分野で静音化ニーズが高まっていることや、最近めざましい進歩を遂げるデジタル信号処理技術の強力な支援によって制御技術としてのアクティブコントロールに大きな期待が寄せられていること、さらに、コスト的にも現実的なものとなりつつある実用化技術として期待が大きいことなどが考えられる。本特集では、アクティブコントロールの中でも、active noise controlを主体に解説しているが、active vibration controlや音場制御としての側面についても述べている。ところで、アクティブコントロールの歴史を振り返ると、1936年にP. Luegによって提案されたアクティブノイズコントロールのアイディアは、音環境の新しい制御技術として成長する可能性を期待して、特に、1970年代から音響学者を中心に制御理論の研究や消音装置の試作研究が行われていた。しかしながら、当時は現在ほどの関心はなくパイロット的な研究がほとんどであった。ところが、1980年後半から特に最近の10年間においてアクティブコントロールの研究は新たな展開の様相を呈し、研究開発が急速なピッチで実施されるに至った。道路交通騒音、鉄道騒音、プラント騒音、設備騒音から機器単体の騒音に至るさまざまな騒音問題において、静音化ニーズが高まっていることもあるが、研究の加速は、先に述べたデジタル信号処理技術の革新的な発達によるところも多い。

ところで、アクティブノイズコントロールは従来の、吸音、遮音などの原理に基づく、いわゆる受動的な騒音対策技術ではなく、人工的に作った同振幅・逆位相の音（2次音源）を騒音にぶつけてその騒音のレベルを低減したり、あるいは、2次音源を騒音源の近傍に持っていく、そこから放射される音のエネルギーをできるだけ小さくしようとする技術である。原理的には至極簡単である。しかし、言うは易く行うは難しく、効率のよい消音のためには高精度の信号処理技術が要求され、また、周囲環境（温度、伝送特性など）の変化、経時変化などに

も時々刻々対応していかなければならない。そこで用いられているのが適応デジタル・フィルタである。

適応フィルタとは、周りの環境変化に学習しながら自分自身の特性を変化させていくことで制御を行うフィルタである。実時間で実現するためには、デジタル信号処理専用のVLSIが使われる。

基礎研究と実用化が同時進行

1970年代は、理論的な研究が主体であったが、すでにこの時期に城戸らは、出力6MVAの変圧器を対象とした実機試験を行っている。実証結果によれば、騒音低減効果は方向に依存するものの、変圧器騒音の基本周波数である100Hzを20dB程度軽減している方向もある。3個のスピーカ、マイクロホンを利用したおそらく最初の多点制御の実験である。

それでは、現在応用されているものにはどのようなものがあるのだろうか。アクティブノイズコントロールが、家電製品として適用されたものに冷蔵庫がある。コンプレッサーから発生する騒音の低減に応用された。また、市民会館、コンサートホールなどの空調用ダクト騒音の消音装置にも活用されている。また、乗用車内のエンジンから出るこもり音の除去にも採用され、3次元音場への適用例として話題となった。騒音を低減して静かな空間とすることで、ドライバーの疲れを軽減するという聴感的な効果も期待されている。このように、実用化研究が行われているにもかかわらず、まだまだ未解決の問題が山積している。たとえば、実用化が比較的早いとされていたダクト内騒音に対する応用においてさえも、多くの基礎研究が懸念に進められている状況である。これは、非常に広範な応用が存在すると同時に、それぞれで考えなければならない特有の問題（たとえば、温度、気流、専用ディバイス、ライフ、適応スピードなど）が多いという騒音問題の難しさを反映しているといえよう。ダクト騒音への応用では、空調ダクトシステムのみならず、振動ふるいやゴミ焼却炉の排気ダクトのような産業プラントにおける事例も発表されている。

1次元空間から3次元空間の応用へ

さて、研究対象の推移を見てみると、基本的にはダクト内騒音の低減にみられる1次元空間での応用から、室内などの3次元空間への応用へと研究は移り変わっている。しかしながら、ダクト内音場であっても、ダクト寸法で決まるある周波数よりも騒音の周波数が高くなってくると、もはや、断面内での音波の様子は一様ではなくなり（平面波伝搬と仮定することができなくなり）、2次元の音場となっていく。まして、3次元の音場を扱うとなるとそう簡単な問題ではないことが予想されるであろう。現在のところ、3次元閉空間の応用では音波の波長が部屋の大きさに比べて大きい、言い換えると低周波数の騒音についてのみアクティブノイズコントロールが有効であるとされている。また、制御の側面からの要求で、騒音源が特定でき、また、その情報が何らかの方法でピックアップできることが前提となっている場合が多い。このようにして眺めてみると、乗用車室内のこもり音低減への応用は、室内の寸法、騒音源の特定など、アクティブノイズコントロールを適用しやすい3次元空間の例であるといえよう。プロペラ飛行機内のエンジン騒音に対する応用もこの延長上にあると考えられる。また、動く騒音源を対象にし、障壁からの回折音を低減させようとするアクティブ防音壁の研究なども行われている。これらの事例から、通常の室内で、しかも広いエリアに渡ってグローバルに騒音を低減することは実用上難しいことが了解されるであろう。

パーソナルな静寂空間・音場再生

しかしながら、たとえば、人の頭部周辺に静かな空間（Quiet Zone）を作り出すといったことは可能である。たとえば、筆者らの研究室ではANC Chairと称して、椅子にANCシステムを装備したパーソナル空間での消音システムを開発した。後方と側方にある4つのスピーカを騒音を打ち消す2次音源として、両耳の近傍にある4つのマイクロホンがリアルタイムに消音のパフォーマンスをモニタする。DSPコントローラは、このパフォーマンスが最適になるように常に適切な2次音を作るように制御を行う。この装置を用いることで、たとえば、工場などで騒音にさらされているオペレータなどの頭部周辺にQuiet Zoneを作り出し、少しでも静寂な音環境で働くような作業環境の改善を目的としたものである。また、制御点を両耳の2点に限定すれば、広帯域での制御も可能であるので、音楽再生システムへの応用も考えられる。トランスポーラルシステムとして知られている2つのスピーカを用いた3次元音場再生システムもこの

ような範疇に分類することができる。原理的に受聽サービスゾーン（等化エリア）が必然的に狭くなる欠点があったが、優れた音像定位、仮想音源による自由度のある再生能力が着目されていた。最近、再生用スピーカを近接配置したシステムも提案され、等化エリアの問題も実用に十分耐えるようになってきたので、実用化が期待されている。

音場制御技術

幅広い分野をマスターした スペシャリストが要求される

ところで、音響学は元来、学際的な学問の典型といわれているが、アクティブコントロールも例外ではない。すなわち、よいものを作るためには、適用しようとするターゲットのことは勿論のこと、音響学（聴覚、電気音響など）、デジタル信号処理（ソフト、ハード）、ディバイスなど幅広い分野に精通している人材が必須であるということである。すなわち、システムが非常に多くの、しかも相互に深く関係したパラメータからなっているため、単に専門家を集めただけではだめで、全体を見通せる優れたスペシャリストが必要であることが特徴である。今後、このような傾向はますます強くなっていくものと思われる。西暦2000年代のエンジニアに相応しい人材教育の重要性を再認識させられる。

より良い音環境を目指して

アクティブノイズコントロールはどんな騒音にも適用できるわけではなく、特に低周波域での消音に有効な技術として期待されている技術である。今後、従来の受動素子を用いた騒音低減技術と相補する技術として発展していくものと思われる。現在のところ、本来のアクティブコントロールの利点を十分に発揮しているとは言いがたい。たとえば、騒音のスペクトル制御（音色の制御）など、本来、電気的にシステムを制御しているため、受動的な手段によるよりも、自由度の高い制御が可能である筈である。すなわち、単に騒音がないとか音楽が聞けるではなく、積極的に音場をデザインするという技術に発展する可能性がある。今後、ディバイス、専用コンロトーラなどの周辺技術の発展とともに、上述した利点を生かした新しい騒音対策技術として発展していくことを望む。「人間は何を快適に感じるのか」という問題は、Quality lifeの向上、製品の開発には常に付きまとう非常に難しい問題であるが、音響工学の分野でも新しいパラダイムの変化はまさにこの点にあるといえよう。