

2-4-12

空調ダクト騒音の能動的消音装置の研究 (その1)

～ 大口径ダクト適用時の効果の広帯域化法について ～*

伊藤 修一 田中 康信 (ダイダン (株))
青木 雅夫 (青木応用音響 (有))

1. はじめに

能動騒音制御 (ANC=Active Noise Control) は、デジタル信号処理技術の発達とともに盛んになり、特に空調ダクト騒音に関する研究成果は数多く発表されるようになった。

ANCによる消音は、パッシブ消音器では困難であった低周波騒音の消音にすぐれていること、パッシブ消音器のように広大な設置スペースを必要としないことなど利点の多い方法である。現在では、制御の安定性(信頼性)の保証や性能の向上、経済性など、実用的な装置の開発に対する関心が高まっている。

筆者らは、大口径ダクト適用時における制御帯域の拡大を目的としたスピーカの設置方法の検討、逆流音及びハウリングの対策としてマイクロホンとそれを収納するホルダの検討を行ったので報告する。

ここではスピーカの配置の検討について報告し、第2報ではマイクロホンの特性、マイクホルダの形状について報告する。

2. ANCとダクト内音響上の問題

ダクト内伝搬騒音をANCにより消音する場合、その対象となる空間は一次元音場であることが前提となる。

ダクト内を一次元音場と考えることができるのは低周波領域のみであり、その上限周波数はダクト横断面内に生じる一次定在波の周波数程度であると考えられる。その周波数 f_l は、

$$f_l = \frac{c}{2l} \text{ [Hz]} \quad \dots(1)$$

ここに、 l : ダクトの一辺寸法[m]

c : 音速[m/sec]

で表される。従ってダクトの口径が大きくなるほどその上限周波数は低くなる。この問題に対し、大口径ダクトを口径の小さいいくつかのダクトに分割し、それぞれのダクトを制御する方法⁽¹⁾や三次元空間の制御アルゴリズムの研究⁽²⁾なども行われている。

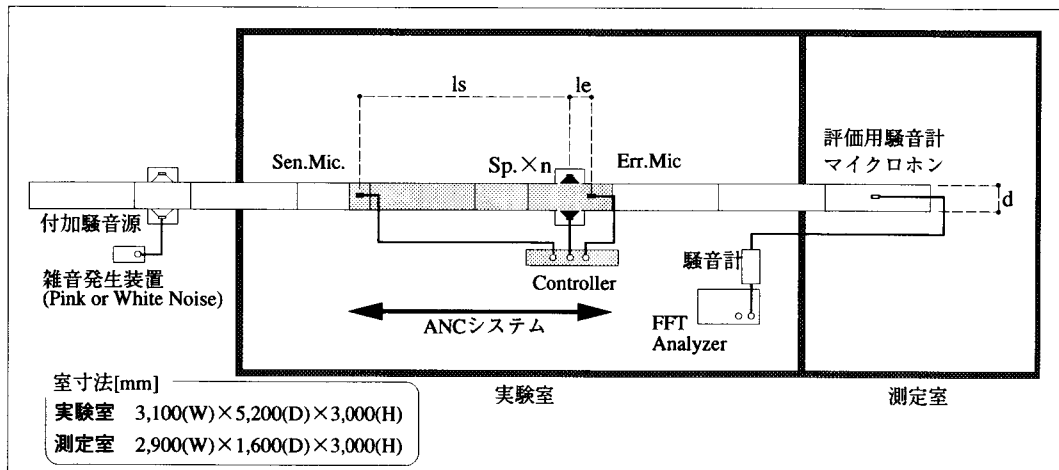


図1: 実験概略図

*Active Noise Control System for Air-Conditioning Ducts Noise (Part 1)

Study on Loudspeaker Systems for Broad Band ANC.

By Shuichi Itoh, Yasunobu Tanaka (DAI-DAN CO.,LTD.) and Masao Aoki (Aoki Applied Acoustics)

3. 実験のシステム構成

システム構成要素の配置など、実験概略図を図1に、寸法などは実験によって異なるので表1にまとめた。

実験室・測定室は、ともにサンドウィッチパネルで仕切られた簡易なものであるが、天井・床・壁、6面全てにグラスウールを貼って吸音処理を施してある。実験ダクトは、実験室の壁を貫通して一直線になるよう設置し、付加騒音がダクト外へ透過しないよう、鉛板を巻いてある。

測定室の外のダクトに設けられた付加騒音源用スピーカより Pink Noise あるいは White Noise を付加騒音としてダクト内に放射し、実験室内に設けられたANCシステムにより消音を行った。評価点は、ダクトの下流側開口端に近い、ダクト内横断面中央とし、騒音計のマイクロホンを設けた。

なお、この報告では騒音の伝搬方向を考え、騒音源側を上流、評価点側を下流と定義する。

4. スピーカ駆動部の定在波の検討

まず、ダクト横断面方向に生じる定在波がANCの効果を妨害することに着目し、この定在波の除去について検討した。

一方が閉じた閉管の他方を駆動した場合の定在

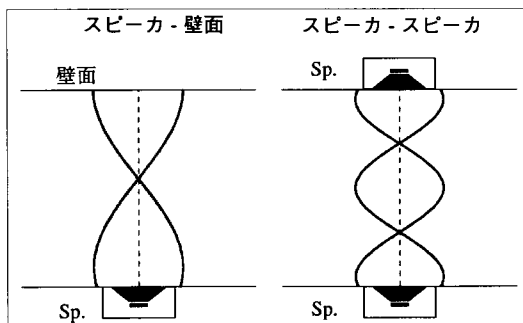


図2：ダクト壁面間に生じる1次定在波

表1：実験条件

装置 寸法 法等	ダクトサイズ(d)	450×450[mm]	900×900[mm]
	Sen.Mic.-Sp.間距離(ls)	2,000[mm]	2,000[mm]
	Sp.-Err.Mic.間距離(le)	500[mm]	1,200[mm]
	Sp.設置個数(n)	1・2個	2・4個
	マイクロホン位置	ホルダ内	ホルダ内
制御	付加騒音	Pink Noise 100[dB]	Pink Noise 100[dB]
	Sampling 周波数	3k[Hz]	12k[Hz]
	A/D,D/A Low Pass Filter	1.0k[Hz], 8次	5.0k[Hz], 8次
	Digital Filter tap 数	W=256, \hat{C} ・Hr=128	W=700, \hat{C} ・Hr=128

波の波長は、

$$l = \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots(2)$$

ここに、 l : 管の有効長
 λ : 波長

と表される。⁽³⁾

また、管の両端を同相で駆動したときの管内の音圧分布 $p(t, x)$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} p(t, x) &= P \left\{ \sin(\omega t - kx + \varphi_i) + \sin(\omega t + kx + \varphi_r) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega t + k(x-l) + \varphi_i) + \sin(\omega t - k(x-l) + \varphi_r) \right\} \\ &= 4P \cos\left(k\frac{l}{2} - \frac{\varphi_r - \varphi_i}{2}\right) \cos\left(k\left(x - \frac{l}{2}\right)\right) \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_i + \varphi_r}{2}\right) \dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 ω : 角周波数
 k : 波長定数
 φ_i : 正方向音波の位相
 φ_r : 負方向音波の位相
 P : スピーカ放射音の最大振幅

これより、定在波の腹と節は次のように決まる。

$$\begin{aligned} \text{腹} \quad x &= \frac{l}{2} \pm m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ \text{節} \quad x &= \frac{l}{2} \pm (2m+1) \frac{\lambda}{4} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

式(4)から管の中央部が必ず腹となることがわかる。このため定在波は、閉管の片側駆動では半波長毎に発生するが、両側駆動では1波長毎にしか発生しないことになる。

したがって、スピーカを図2のようにダクトに設置した場合、相対した同相駆動のスピーカ間で生じる定在波は中央部分で腹となる。スピーカ・壁面間で生じる定在波に比べると、波長が短くなり、その周波数は2倍程度となると考えられる。

5. 実験による検討

5.1 制御実験

4. の検討結果から、同相駆動のスピーカをダクト壁面に対向して設置することで大口径ダクト適用時にも制御帯域の拡大が図れると考え、確認のための制御実験を行った。

消音用音波を放射するスピーカの個数と設置位置を図3に示す。なお、複数のスピーカを設置している場合は、全て同相の信号により駆動している。

以下のように算出した1/3オクターブ減音量を制御効果とし、各条件における制御効果を比較した。

ダクト下流端付近に設置した騒音計でANCシステム ON時 -OFF時の両方の音圧を測定し、FFTアナライザによって周波数分析した。分析周波数レンジは1,000 [Hz] あるいは500 [Hz] とし、ライン数は400とした。つぎに、周波数分析して得られたスペクトルの各周波数の音圧レベルを、1/3オクターブバンド毎にエネルギー加算して1/3オクターブ音圧レベルとし、ANCシステム OFF時の値から ON時の値を減算することで1/3オクターブ毎の減

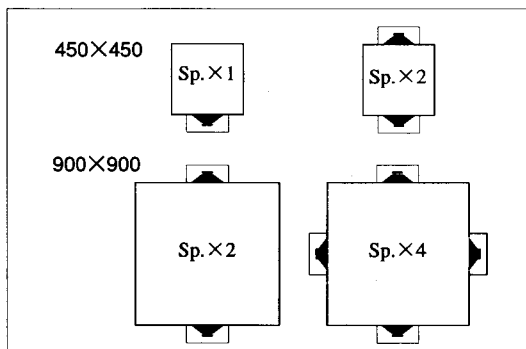


図3：スピーカ配置

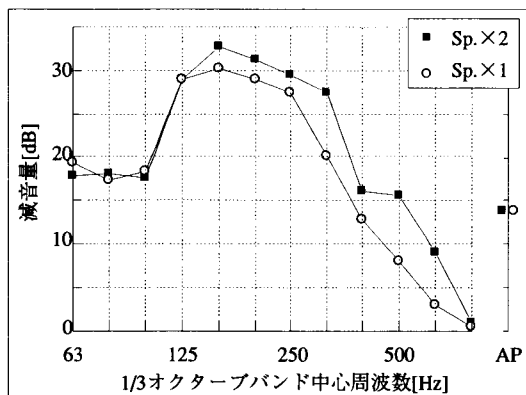


図4：スピーカ個数と減音量(450×450ダクト)

音量とした。

図4と図5に制御結果を示す。

先に示した式(1)から求められる制御の上限周波数は、450×450ダクトでは380 [Hz]、900×900ダクトでは190 [Hz] となる。

制御の効果は、エラーマイクロホンの設置位置とも関係するが、900×900ダクトでは、スピーカを4個用いた場合にスピーカ2個のものに比べ上限周波数が約2倍程度上昇しており、160 [Hz] のバンドで最大20 [dB] の効果の増大が見られる。

また、450×450ダクトでは、1個の場合でも上限周波数380 [Hz] を越える範囲でも効果が見られるが、2個のスピーカを用いた場合には、315～630 [Hz] のバンドで更に5 [dB] 以上の効果の増大が見られる。

5.2 ダクト横断面音圧レベル分布の測定

つぎに、駆動する消音用スピーカが2個のときと4個のときのダクト横断面音圧レベル分布を測定した。測定断面は図6に示すように900×900ダクトのスピーカ設置部から下流側へ900 [mm] の断面である。対象とした周波数は、このダクトの上限周波数190 [Hz] の2倍に近い400 [Hz] を中心とする1/3オクターブバンドのものである。

測定結果を図7に示す。

2個のスピーカを相対して配置した場合には、断面の対角線上にモードの節が発生しているのがわかる。このモードは、正方形断面内に生じる定在波を固有振動指数 (n_x, n_y) で表せば、(1,3) と (3,1) のモードであり、両者の定在波の位相が180° ずれた、

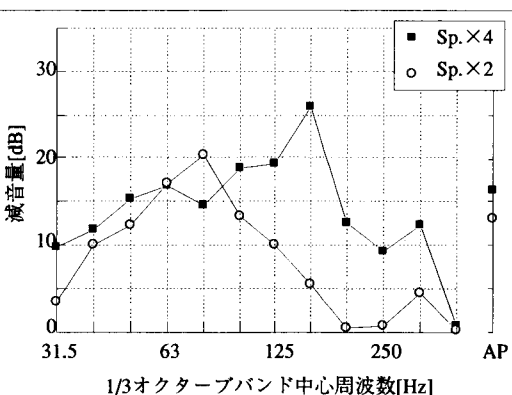


図5：スピーカ個数と減音量(900×900ダクト)

同振幅の場合に生じるとされている⁽⁴⁾。そして、互いに隣り合う音圧レベルの高い部分は逆位相となっている。

この場合、同一断面内の位相が大幅に異なっており、センサマイク:1, 二次音源:1 (スピーカ複数使用), エラーマイク:1の一次元のANCでは対応できない条件となっており、制御の効果は期待できない。

一方、スピーカ4個を用いた場合には、断面の周辺部の音圧レベルが高めになっているが、スピーカを2個用いた場合に生じているモードは完全に抑制されている。

しかし、対象としているダクト内伝搬騒音は、そのダクトの上限周波数 f_c より高い周波数になると断面内で同相とは考えられない。そのため、先に述べたように複数のスピーカを用いて消音用音波の位相をそろえて放射しても、ダクトの上限周波数の2倍程度の周波数が、制御の限界と考えられる。

以上5.1.5.2より、複数のスピーカを適切に配置することにより、消音用の音波がダクト内に形成する低次のモードを抑制でき、制御帯域の拡大を図れることがわかった。

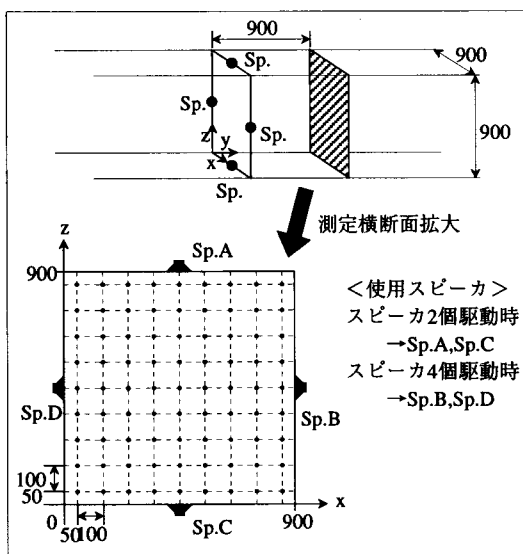


図6: ダクト横断面内音圧レベル分布の測定点

6. まとめ

(1) 複数のスピーカを、ダクトの対向壁面に設置することにより大口径ダクトにおいても広い周波数帯域を消音することが可能になった。

(2) 2個のスピーカを相対して配置した場合にも効果の増大が見られた。

(3) 相対する4つの壁面に4個のスピーカを配置した場合にもっとも大きな効果が得られ、2個の場合には発生していた断面内のモードを抑制することがわかった。

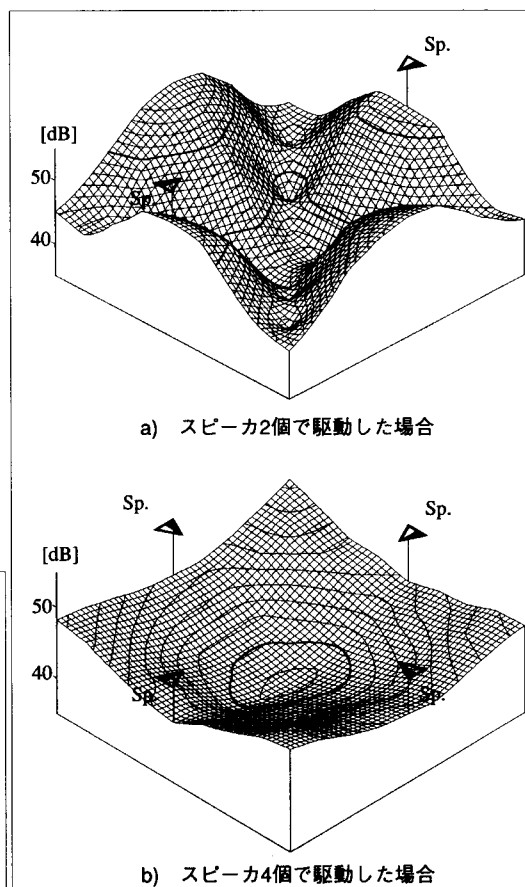


図7: スピーカの個数とダクト内の音圧分布

<参考文献>

- (1) 松本・後藤田・高橋「大口径ダクトに対する電子消音システムの適用 (その1)」日建学会講演梗概集、1995/8
- (2) 伊勢「マルチカスケード型アクティブ騒音制御装置の開発とその効果」日音学会公論集、1996/3
- (3) 小橋「音と音波」裳華房、1969
- (4) 伊藤「音響工学原論」コロナ社、1971