

## ダクト系に用いる消音器に関する実験

勝田 高司・後藤 滋・寺沢 達二

### はしがき

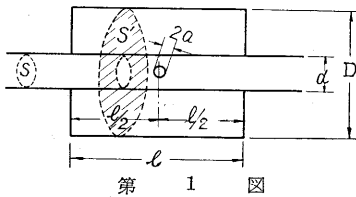
空気調整を行なう場合に、しばしばその騒音が問題となる。その主なものは送風機あるいはダクト系途中において発生した音が、ダクトを通して室内に放射されるため、また室内に取り付けられた空気吹出口による発生騒音が原因となる場合もある。それゆえ、ダクト系の騒音制御に関してはこれら各部分における発生音が大きな問題となるが、他方これらの騒音をダクト系途中において消音する方法も重要課題である。ここではダクト系の消音計画において用いられる、これに適した二、三の消音器の特性について述べる。

### 1. 連続共鳴形消音器

消音器の種類には各種のものがあり、ダクト内面あるいはセル形吸音材内貼、またはダクトのバンドなどが多く用いられているが、これらは高周波域の消音にたいしては効果的であるが、低周波域では余り有効でない。低周波域の消音にたいしては、任意の周波数域に適するものが容易に製作できる共鳴形消音器がしばしば使用される。これは多く主ダクト送風機直後に設けられ、空気抵抗の極めて少ないのが特徴である。

#### (1) 理論式

(a) 単一共鳴器：第1図のようなダクトの周囲に空洞を形づくる共鳴器による減衰特性は、両端無反射ほか二、三の仮定のもとに平面波の理論から次式のように与えられる<sup>(1)</sup>。



空洞を形づくる共鳴器による減衰特性は、両端無反射ほか二、三の仮定のもとに平面波の理論から

$$\text{減衰量 (db)} = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{2m}{2kS' - \cot k \frac{l}{2}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

また、 $kl$  の小さい範囲では次のように書きかえられる。

$$\text{減衰量 (db)} = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left( \frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここに、 $m = S'/S$ 、 $S$ 、 $S'$  = ダクトおよび空洞の断面積、 $k = \omega/c = 2\pi f/c$ 、 $l$  = 空洞の長さ、 $\omega = 2\pi f$  角速度、 $f$  = 周波数、 $c$  = 音速、 $c_0 = n\pi a^2 / (l_c + \beta a) \approx 2na$ 、( $n$  = 孔の数、 $a$  = 孔の半径、 $l_c$  = 孔の長さ (この場合無視される)、 $\beta \approx \pi/2$ )、 $V$  = 空洞の容積、 $f_r$  = 共鳴周波数。

以上の2式は Davis 他による実験値<sup>(1)</sup>とよく一致し

ている。

(b) 連続共鳴器：同形の共鳴器が連続する場合に、これが無限に連なるものとして、その各個ごとの減衰は次式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$\frac{P_m}{P_{m+1}} = e^{-b}, \therefore \text{減衰量 (db)} = 20 \log_{10} \frac{P_m}{P_{m+1}} = -8.69b \quad (3)$$

ここに、 $\cosh b = \pm \left( \cos kl_1 + i \frac{Z}{2Z_b} \sin kl_1 \right)$ 、 $P_m, P_{m+1}$

= 各個共鳴器の入口、出口における音圧、 $l_1$  = 相隣る共鳴器の相互距離、 $Z$  = 反射のない場合のダクトの音響インピーダンス ( $\rho c/S$ )、 $Z_b$  = ダクトより共鳴器をみたインピーダンス。

$kl$  の小さい範囲では  $M$  個の共鳴器による減衰量は次式で与えられる。

$$\text{減衰量 (db)} = -8.69M \cosh^{-1}$$

$$\left| \cos \left( k_r l_1 \frac{f}{f_r} + \frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} \frac{f}{f - f_r} \sin \left( k_r l_1 \frac{f}{f_r} \right) \right) \right| \quad (4)$$

ただし、 $M$  = 連続共鳴器の個数、 $V$  = 各個共鳴器の空洞容積、 $k_r = 2\pi f_r/c$ 、 $f_r$  = 共鳴周波数。

(2)および(4)式において、共鳴周波数は次式で与えられ

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{c_0/V} \quad \text{または} \quad k_r = \sqrt{c_0/V} \quad (5)$$

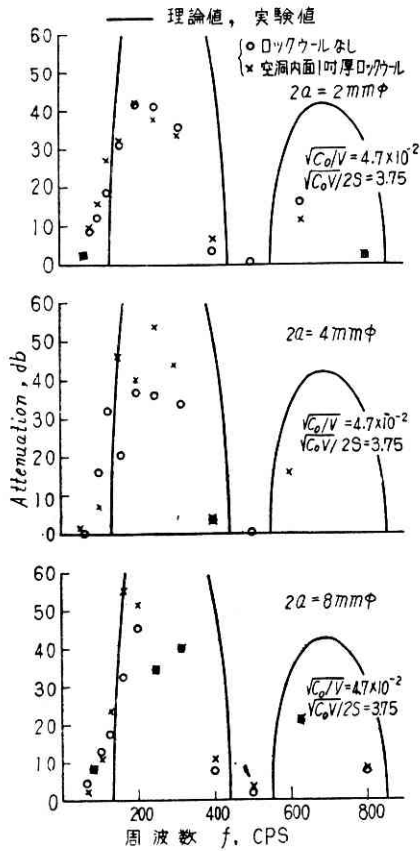
また、減衰量の大きさは  $\sqrt{c_0 V}/2S$  によって支配される。そして共鳴周波数の付近では、両式における第2項は第1項に比して大きくなるので、減衰量はほぼ  $(\sqrt{c_0 V}/2S)^2$  の対数 ((4)式についても変形してえられる) に比例的である。

2個以上の有限個の共鳴器が連続する場合にも上式を適用して差支えない<sup>(1)</sup>。

#### (2) 実験値

4連続の場合の実験値を第2図および第3図に示す。測定法<sup>(3)</sup>は、(3)式に示したように各個ごとに音圧が指数函数的に減り、そのレベルは直線的に低くなるから、ダクト中にマイクロホンを移動して、連続共鳴器部分における音圧レベルの平均の勾配を求め、これより換算する。実験はすべて8吋径ダクトの場合について行なった。

(a)  $V, \sqrt{c_0 V}$ 一定として孔の大きさを変えた場合：この場合  $c_0$  も一定であるが、孔の径 ( $2a$ ) の選び方は自由である。オリフィスの場合には



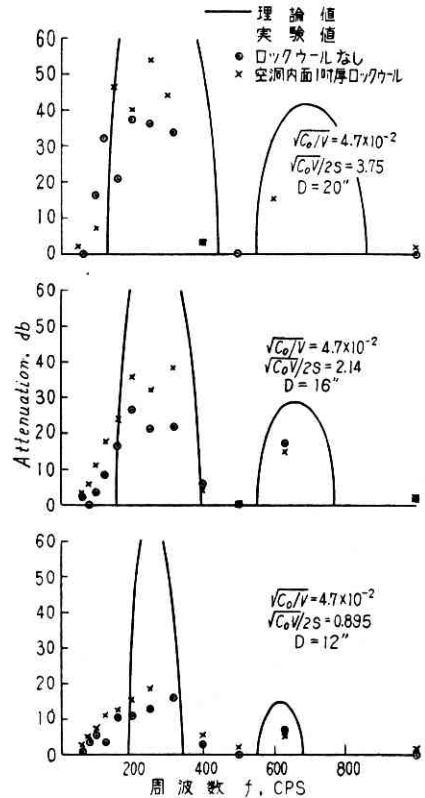
第 2 図 連続共鳴形消音器の減衰特性  
(孔径を変えた場合)

$$c_0 = \frac{n\pi a^2}{l_c + \beta a} \approx 2na \quad (\beta \approx \pi/2) \quad (6)$$

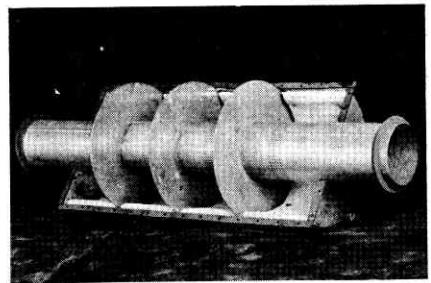
となり、孔径を2倍にするときは孔の数  $n$  を  $\frac{1}{2}$  にすればよい。 $d=8$  吋、 $D=20$  吋、 $l_1=1$  呎の4連続共鳴器について、共鳴周波数  $f_r=250$  cps にとった場合に、孔の径  $2a=2, 4, 8$  mm $\phi$  としたときの比較をしたものが第2図である。減衰特性は孔径によってほとんど変化しない。しかし、さらに径を小さくすれば、粘性の影響をうけて、抵抗分を増し、減衰量の最大値は減るのである。また空洞内面をロック・ウール貼りしてもほとんど変化しないが、孔径の大きいときいく分影響しているようである。

(b)  $\sqrt{c_0/V}$  一定として、 $V$  を変化させた場合:

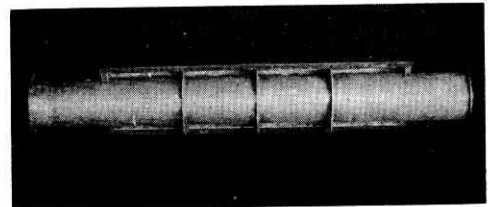
連続形において、共鳴周波数を一定にとるとき空洞容積  $V$  の影響をみる。 $d=8$  吋、 $l_1=1$  呎で、 $D=20, 16, 12$  吋と減じた場合の減衰特性を第3図に示す。 $\sqrt{c_0/V}$  は一定とするから、 $V$  を減らせば  $c_0$  もこれに比例して減らさねばならず、結局  $\sqrt{c_0/V}/2S$  は  $V$  の減少に比例して減少する。測定結果は図にみるように、ピークにおける減衰量が減少しているが、減衰周波数の幅についてはあまり変化がみられず、理論値とはかなりの相違を示す。また、ロック・ウール内面貼の影響がこれらの場合



第 3 図 連続共鳴形消音器の減衰特性  
(空洞容積を変化した場合)



内径 8 吋、外径 20 吋の場合、空洞内面 1 吋厚ロック・ウール貼り (a)

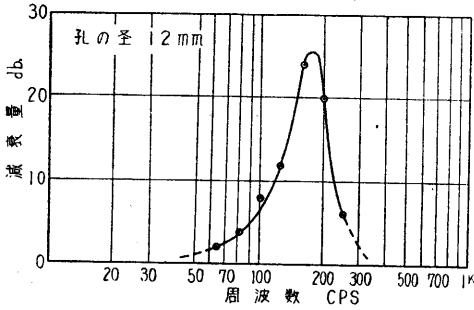


内径 8 吋外径 12 吋の場合 (b)

写真-1 供試 4 連続共鳴形消音器(共鳴周波数 250cps) に多少みられる。

(c) 大形連続共鳴器の例: 連続形の場合には、その減衰量は非常に大きくなるが、共鳴周波数付近でのそれは計算値から大きくかけ離れるので(粘性抵抗を無視しているから)、この値を予測することが困難である。次

に 36 吋×36 吋の角ダクトに設ける大形の連続共鳴形消音器において、空洞の厚さ 6 吋，共鳴器相互距離  $l_1 = 1$  呎，孔径 12mmφ 使用のものが 5 連続する場合の特性を第 4 図に示す。



第 4 図 36"×36" ダクトに使用した消音器の特性 (純音による)

この共鳴器の諸因子の値は， $c_0 = 2na = 252\text{cm}$ ， $V = 1.99 \times 10^6 \text{cm}^3$ ， $f_r = 190\text{cps}$ ， $\sqrt{c_0/V} = 3.55 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ ， $\sqrt{c_0 V}/2S = 0.423$  などである。これに対して，前記実験 (a) の場合の  $\sqrt{c_0 V}/2S = 3.75$ ，最大減衰量は 40db 程度とみなせる。最大減衰量は前述のように  $20 \log_{10} (\sqrt{c_0 V}/2S)$  に比例的であるから， $\sqrt{c_0 V}/2S$  の値の比  $p = 0.423/3.75 = 1/8.86$  とすれば，減衰量の差は

$$20 \log_{10} p = -20 \log_{10} 8.86 = -19 \text{db}$$

∴ 最大減衰量  $\approx 40 - 19 = 21 \text{db}$  (4 連続について)

第 4 図において，5 連続の場合の最大減衰量が約 25 db であるから，4 連続については約 20db となりよく一致する。

(3) 共鳴形消音器に気流を通した場合の発生音

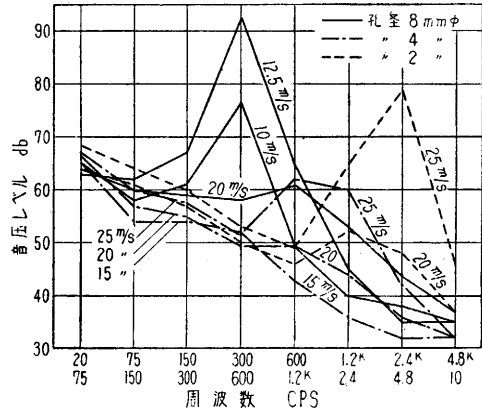
共鳴形消音器は特定周波数の音に対して優れた消音効果を表わすが，これを実際にダクト系に使用し気流を通した場合には，逆に外部よりエネルギーを与えられて共鳴音を発生する可能性がある。前掲供試体のうち，内径  $d = 8$  吋，外径  $D = 20$  吋のものについて，孔径 2，4，8 mmφ を用いた場合の性能を比較した。

(a) 測定方法：まず，ダクト系に生じている騒音をダクトの開放端側方において測定し，次に供試消音器を開放端より約 5 m 隔った直管部に挿入して，同一位置における騒音を測定して比較する。

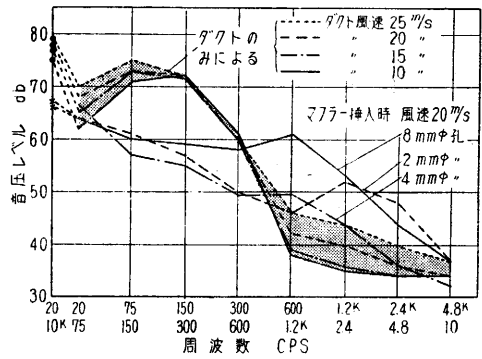
(b) 測定結果：3 供試体いずれの場合にも，特定の風速において，鋭い特定周波数の音を発生する。すなわち，孔径 2 mmφ のときには，風速 21m/s をこえ，25~6 m/s のところで 2,630 cps の強い音 (79db) を発生する。孔径 4 mmφ の場合にも，風速 20m/s をこえ 26 m/s までの間に，風速のわずかの差により，1,200，1,350 および 1,680 cps の 3 種の音を発生し，それぞれ 68，77，75 db におよぶ。孔径 8 mmφ の場合には，逆に低速 9~17 m/s の間で共鳴をおこし，10m/s 付近で 380 cps，13

m/s 付近で 430 cps の音を発生し，それぞれ 77 および 92.5db にもおよぶ。そして 20 m/s 以上の風速ではとくに顕著な発生音はおきない。

これらの実験結果をオクターブ・バンド別に分析して示したのが第 5 図 (a) および (b) である。とくに発生



共鳴形消音器の発生音 (a)



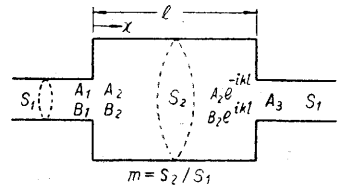
共鳴形消音器に気流を通した場合の消音性能 (b)

第 5 図

音のおきない場合には，消音器の減衰特性にはほぼ近い効果で 250 cps 前後の音が減衰されている。また，20 m/s の気流にたいしては，孔径 4 mmφ のものがもっとも性能がよいようである。

2. 箱形消音器

ダクト系に用いる最終段消音器として，吹出口直前に箱形消音器が多く使用される。これには普通，ダンパーおよびディフューザと一体になったものが多く，減圧および吹出口気流分布の均等化を兼ねているが，その消音機構からみると



第 6 図

とき，一種の断面変化による音響フィルタとみなすことができる。ここでは，断面変化として箱形を採用した

場合の箱寸法の影響について述べる。

(1) 断面変化による音の減衰 (理論式)

第 6 図に示すようなもっとも簡単な断面変化による音の減衰量は、両端無反射として、平面波の理論から、二三の仮定のもとに次式により計算される<sup>(2)</sup>。

$$\text{減衰量}(\text{db}) = 10 \log_{10} \frac{A_1^2}{A_3^2} = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right\} \quad (7)$$

ただし、 $A_1, A_2, A_3$  = 各場所における入射波の音圧の最大値、 $B_1, B_2$  = 各場所における反射波の音圧の最大値、 $m = S_2/S_1$ 、 $S_1, S_2$  = ダクトおよび拡大部の断面積、 $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$ 、 $l$  = 拡大部の長さ、 $\omega = 2\pi f$  角速度、 $f$  = 周波数、 $c$  = 音速、 $\lambda$  = 波長。

また、拡大部入口における反射音圧と入射音圧との比  $R_1$  (反射係数) は次式のようになる<sup>(4)</sup>。

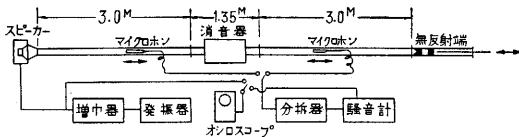
$$R_1 = \frac{B_1}{A_1} = - \frac{i \frac{1}{2} \left( m - \frac{1}{m} \right) \sin kl}{\cos kl + i \frac{1}{2} \left( m + \frac{1}{m} \right) \sin kl} \quad (8)$$

$$\therefore |R_1| = \frac{|B_1|}{|A_1|} = \frac{\frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl}{1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl} \quad (9)$$

以上より、減衰量あるいは反射係数に関係するのは  $m$  の値、すなわちダクト断面積に対する拡大部断面積比の大きさで、その形状には関係しない。そこで、拡大部を箱形とし、漸次偏平とした場合の理論の適用限界について検討した。

(2) 測定方法

(a) 測定装置：装置の概要を第 7 図に示す。消音器



第 7 図

の前後にそれぞれ 3.0M の直管ダクトを連結し、その一方にスピーカを、他方に無反射端を取り付ける。発振器を用いてスピーカより純音を送り込み、前後の直管ダクト内における音圧レベルを可動マイクロホン (棒状コンデンサ・マイクロホン) を用いて騒音計にて読みとる。騒音計入力側にはオクターブ・バンド・アナライザを挿入して雑音の入るのを防ぎ、また、スピーカ入力ならびに騒音計出力における波形をオシロスコープにより監視した。

無反射端は種々検討の結果、空隙を介した 2 層のロック・ウール充填層とした。これにより 300cps 以下の測定周波数における最低の吸音率として 85~90% 程度におさえ、他の周波数域においては吸音率 90~95% 以上をうることができた。

(b) 測定法：マイクロホンを移動して、直管部に生ずる定常波の最大、最小音圧レベルを読みとる。後部直管では、無反射端が完全に働いていれば、任意の 1 点において測定すればよいが、実際には完全無反射端をうることは容易でなく、前述のように低周波にあっては吸音率にして 90% 前後、したがって最大最小音圧レベルの差にして数 db をまぬがれない。それゆえ前後部とも音圧レベルの最大最小値をよみとり、それぞれ入射音圧 ( $A_1$ ) レベルおよび透過音圧 ( $A_3$ ) レベルを計算し、その差として減衰量を求める。

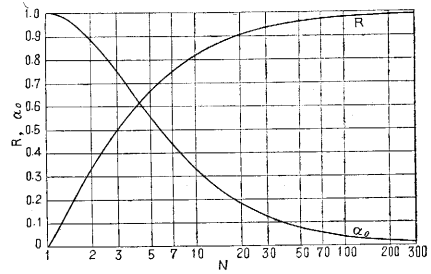
入射音圧などの計算は次のようである。最大および最小音圧の振幅をそれぞれ  $P_{max}$  および  $P_{min}$  とすると、

$$\begin{cases} P_{max} = |A| + |B| \\ P_{min} = |A| - |B| \end{cases} \therefore \begin{cases} |A| = (P_{max} + P_{min})/2 \\ |B| = (P_{max} - P_{min})/2 \end{cases}$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} \frac{|B|}{|A|} &= \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}} = \frac{N - 1}{N + 1} = |R| \\ \alpha_0 &= 1 - |R|^2 = 4 / (N + N^{-1} + 2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし、 $N = P_{max}/P_{min}$ 、 $R$  = 反射係数、 $\alpha_0$  = 吸音率 (第 8 図参照)。また、

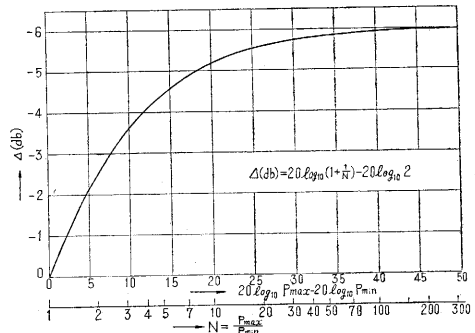


第 8 図

$$\begin{aligned} 20 \log_{10} \frac{|A|}{|P_{re}|} &= 20 \log_{10} \left| \frac{P_{max} (1 + P_{min}/P_{max})}{2 P_{re}} \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{P_{max}}{P_{re}} \right| + 20 \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{N} \right) - 20 \log_{10} 2 \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $P_{re}$  = 基準音圧

すなわち、入射 (あるいは透過) 音圧レベルは、定常波の最大音圧レベルから (11) 式右辺の第 2 および 3 項で補正してえられ、これは  $N$  したがって最大最小音圧レベル



第 9 図 最大音圧レベルに対する補正值

の差の函数として図表化しておけば極めて容易である(第9図参照)。

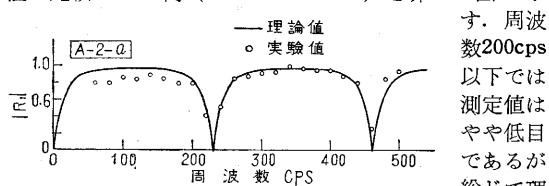
(c) 供試体: 断面比  $m=9$  および  $16$  とした場合に, 断面寸法を次表のように変化させたものである。

記号	寸法(mm)	記号	寸法(mm)
$(m=9)$		$(m=16)$	
A-1-a	375φ × 750L	A-2-b	442D × 442W × 750L
A-2-a	332D × 332W × 750L	A-3-b	250 × 785 × "
A-3-a	250 × 440 × "	A-4-b	200 × 980 × "
A-4-a	200 × 550 × "	A-5-b	163 × 1,200 × "
A-5-a	162 × 680 × "		

備考: 入口, 出口はすべて 125mm φ, 箱の板厚 0.9mm である。

(3) 測定結果

(a) 反射係数: 消音器入口における反射係数を理論値と比較した 1例 (A-2-a について) を第 10 図に示す。

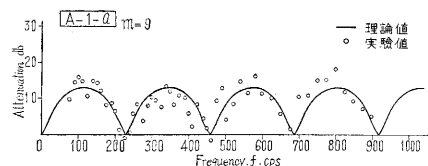


第 10 図 箱形消音器の反射係数(例)

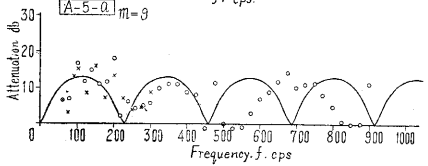
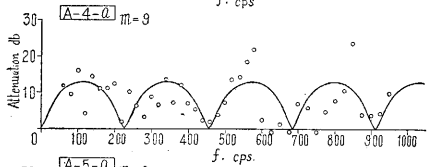
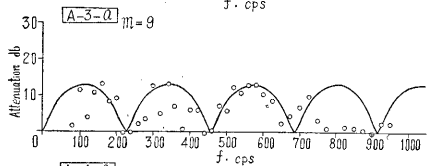
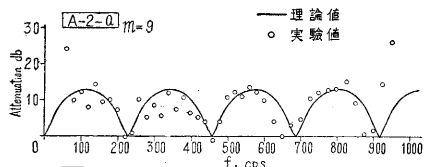
測定値はよく一致し, 入口における反射の大きいことがわかる。

(b) 減衰特性:

(i) 基本形; 断面円形 ( $m=9$ ) の場合の特性を第 11 図に示す。



第 11 図 減衰特性(基本形)



第 12 図 箱形消音器の減衰特性 ( $m=9$ )

第12図に示す。断面正方形 (A-2-a) の場合は基本形の場合とほとんど同じ特性を示し理論値と一致するが断面が次第に扁平となるにつれて, 高周波域における特性が理論値からそれるようになる。

その限界 第 13 図 箱形消音器の減衰特性 ( $m=16$ ) の周波数は, A-3-a: 720 cps, A-4-a: 550cps, A-5-a: 450cps 前後である。

$m=16$  系列の場合も第 13 図に示すように, 低周波域では大体理論値と一致するが, 少し周波数が高くなると一致しなくなる。その限界の周波数も一段と低くなり, A-2-b: 700 cps, A-3-b: 460 cps, A-4-b: 300 cps, A-5-b: 260 cps 前後となる。

(c) 考察: 理論値と一致しなくなる限界の周波数は箱断面の長辺寸法と関係がある。いま波長が箱断面の長辺に等しい周波数についてみると, A-2-a: 1,025 cps, A-3-a: 773 cps, A-4-a: 618 cps, A-5-a: 500 cps, A-2-b: 770 cps, A-3-b: 433 cps, A-4-b: 346 cps, A-5-b: 283 cps となり, 前記限界の周波数よりやや高めであるが, よく関係がみられる。

また限界の周波数以上のところで減衰が行われるのは各種の共鳴が考えられる。箱長手方向に対する閉管として共鳴を考えるとき共鳴周波数として,  $kl = (n + \frac{1}{2})\pi$  より, A-2-a: 516 cps, A-3-a: 386 cps, A-4-a: 310, 930 cps, A-5-a: 250, 750 cps, A-2-b: 384 cps, A-3-b: 216, 648 cps, A-4-b: 174, 522, 870 cps, A-5-b: 142, 426, 710 cps をうる。限界の周波数以下ではこれらの付近で減衰量にいくぶんの谷がみられ, 限界以上では多少のずれはあるが, これらの前後でピークの表われる場合が多い。

謝辞: 本研究に当つては, 高砂熱学工業, 東洋キャリア工業および東京新晃工業 K K 各社の協力を得たことを記し, 謝意を表する。(1958. 11. 12)

文 献

- (1) Davis, D. D. 他: NACA, Rep. 1192 (1954)
- (2) Czarnecki, K. R. and Davis, D. D.: NACA, TN 1688, (1948)
- (3) 勝田, 後藤, 寺沢: 生産研究(速報), vol. 9, No.9, (1957)
- (4) Davis, D. D.: Handbook of Noise Control (1957), -Chapter 21.

(ii) 箱形;  $m=9$  系列の場合を