

# 音響材料の吸音率

五十嵐寿一・子安 勝

(1953年12月18日受理)

## Acoustic Impedance and Absorptivity of Commercial Materials

JUICHI IGARASHI and MASARU KOYASU

(Received December 18, 1953)

**ABSTRACT:** Normal acoustic impedance of commercial materials, such as, tex, felt, rock-wool and glass-wool was measured by pressure-length resonance method. Detail of apparatus used was mentioned.

Absorption coefficients for normally incident sound were calculated from the results. Coefficients of random incidence were also estimated by the formula derived from the normal impedance, which will be useful for the acoustical design of the room.

### §1. ま え が き

講堂や劇場などの音響設計をするときに、まず問題になるのは、内部の形と同時にその壁や天井などに使われる音響材料の性質である。このような材料の性質をあらわす量としては吸音率が使われている。室内では音は壁に対して各方向から random に入射するので、吸音率としてはこれらの統計的平均として求めたものでなければならない。実験的には完全な反射面をかこまれ、外部からの音を遮断した大きな有響室を使つて、試料のあるときとないときとの残響時間の測定から求められる。たゞ欧米でもほぼ完全な有響室といわれているのは 2, 3 を数えるのみであり、わが国でこのような設備をすることは早急には望めない。

吸音率を測定する他の方法は tube method であるが、このとき得られるのは材料に垂直に入射する音に対する吸音率であつて、統計的平均としての吸音率とちがつて音響設計にそのまま適用することはできない。

一方室内音響特性を波動論的に解析することが行われるようになって、壁の材料の垂直音響インピーダンスが理論的にも重要な量になつてきた。

垂直音響インピーダンスとゆうのは、材料の表面での音圧と空気の粒子速度の垂直成分との比であり、その抵抗部分は入射エネルギーの散逸に、リアクタンスは反射のときの位相の変化に関係する。この測定はすでに 10 年以上前から欧米で行われており<sup>(1)</sup>、またこれと吸音率との関係も理論的、実験的に検討がなされている。

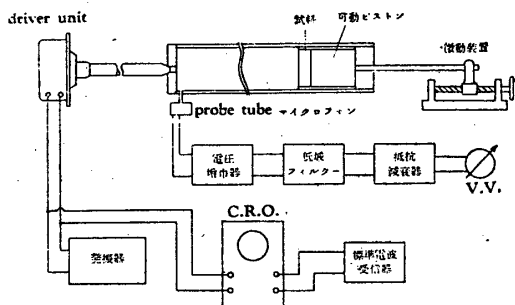
音響インピーダンスを媒介とすれば、任意の条件にある材料の吸音性質を、材料自身の一般的な物性から考えようとするのに役立つ、すでに実際 Morse<sup>(2)</sup>、Beranek<sup>(3)</sup> などによつていくつかのころみがなされている。またこれから吸音の機構を考える手がかりが与えられ、材料の特性を改良するのに役立つものと思われる。さらにインピーダンスを考えることから電気的等価回路を使つて組合せ構造などの総合特性をそれぞれの値から予測できるようなこともある。また音響インピーダンスを室内の音場をあらわす波動方程式の境界条件として入れることによつて、部屋の音響特性をしらべることが原理的に可能になる<sup>(4)</sup>。

このように音響インピーダンスの測定は精度もよく、音響材料の系統的な研究にあつて吸音率よりもいろいろ有利な点があるが、わが国では建

築用として使われている音響材料のインピーダンス測定がまだほとんどなされていない。それで現在製造、使用されている各種の吸音材の垂直音響インピーダンスを Beranek の共鳴法<sup>(5)</sup>によつて測定した。さらにこの結果から垂直入射および random 入射の吸音率を計算によつて求めた。このうち垂直入射吸音率は同じ材料について他の tube method で直接に測定した吸音率とかなりよく一致している。

## §2. 垂直音響インピーダンスの測定装置、および方法

測定装置を第1図のブロック・ダイアグラムで説明する。音源にはホーン・スピーカ用の WE-555 型の driver unit を用い、負荷の影響が及ばないように、これに長さ約 1m, 直径 2.5 cm の管（その中に Al 18 番線をつめたもの）をつなぎ、これを通して測定管の一端の中央にあけた直径 2 mm の細孔から音を入れる。このようにして内部インピーダンスを充分高くして、定電流的音源とみなせるようにした。発振器には安定な真

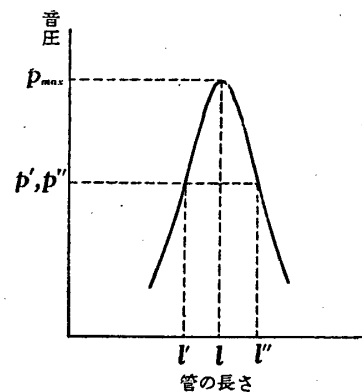


第1図 測定装置

空管発振器を使い、一方 JJY の 1kc を受信して、oscillograph で常に発振周波数を校正して測定するようにした。測定用の管は長さ 125 cm, 内径約 5 cm 肉厚 3 mm の真鍮管で、一端は厚さ 1 cm の真鍮円板で閉じられ、その中央の細孔によつて音源につながる。他端は管の中を試料とともに移動するピストン（厚さ 5 cm, 真鍮製）で閉じられる。そして管全体を振動をふせぐために砂の中に埋めた。管の内面は損失をなるべく少なくするためにラッピング仕上をし、ピストンをすり合せて仕上げて気密を保つようにした。このようにして試料を入れないときの損失を加工前の 1/2 以下にすることができた。ピストンを動か

すには comparator の微動 screw を利用して、1/100 mm の変化までを読むようにした。試料を固定するために、このピストンに真鍮で作った薄いリング状の試料保持具をつけ試料をその内径に合わせて切りかたくはめ込んだ。管の中の音源側の側壁近くの音圧を、図に示すように長さ 3 cm, 内径 2 mm の probe tube によつてロッシェル塩マイクロホンに導き、その出力を増巾器、低域フィルター、抵抗減衰器を通して真空管電圧計で読んだ。

測定にはまずある周波数でピストンを動かして共鳴の位置にする。抵抗減衰器を入れて電圧計が一定値を指示するようにし、そこから抵抗減衰器を 1db づつ抜いて、電圧計の指示が前と同一になるまでピストンを動かして管の長さを変える。



第2図 音圧—管長共鳴曲線

こうして第2図のような管の長さに対する音圧共鳴曲線が得られる。音圧が共鳴のときの値  $P_{max}$  (このとき、試料表面からの管の長さを  $l$  とする) から

$$(P_{max}/P')^2 = (P_{max}/P'')^2 = w \quad (1)$$

で与えられる  $P', P''$  になるときの管の長さを  $l', l''$  とする。  $l'^2 + l''^2 = 2l^2$  の条件がみたされるときには管内の試料面や側壁に対する減衰常数（空気中での減衰を含む）は

$$k = \pi f (l'' - l') / l (w - 1)^{1/2} \quad (2)$$

となる。そこで試料を入れたとき、試料がなく剛壁であるときの二つの共鳴曲線から (2) 式によつて  $k, k_0$  を計算すると、試料の表面での垂直音響インピーダンス  $Z$  は  $k - k_0 < 0.1 (\omega^2 - k^2)^{1/2}$  のときには次の式によつて計算される：

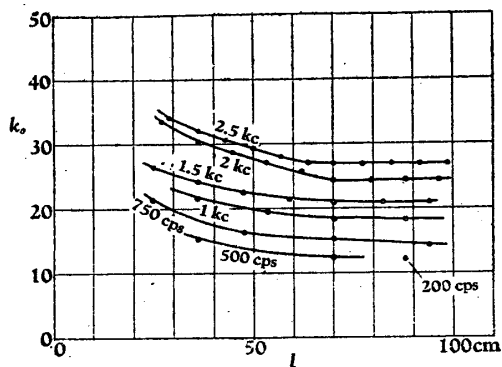
$$Z/\rho c = \coth \left[ (k-k_0) \frac{l}{c} - j \frac{\omega}{c} \right] \left\{ \left( 1 - \frac{k^2}{2\omega^2} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} l - l_0 \right\} \quad (3)$$

ここで  $\rho$ : 空気の密度  
 $c$ : 空気中の音速  
 $j = \sqrt{-1}$   
 $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ : 周波数  
 $T, T_0$ : 試料のあるときと, ないときとの管内の絶対温度

§3. 測定結果

(1) 装置の検討

この方法で測定できる周波数範囲の下限は管の軸方向の固有周波数で, 上限は半径方向の固有周波数で定まる。実験に使った管では, これはそれぞれ約 200 cycle および 8 kc であるが, 使っているスピーカ, マイクロホンの特性によつて, 実際に測定したのは 200 cycle から 2.5 kc の範囲である。この間で管の長さについて,  $k_0$  の値をとつたのが第3図である。各周波数とも管が長



第3図  $k_0$  と管の長さ  $l$  の関係

くなるにしたがつて,  $k_0$  は一様に減少していることから, 管の中の位置による損失の不均一さはほとんどないものと思われる。500 cycle 以下で  $k_0$  の値がほとんど変らないのは, 低音で管にもりがあるためと思われる。 $k$  および  $l$  の測定値のばらつきはそれぞれ 1.5%, 0.5% 以内であつて, これは材料自身の不均一さ, また多孔材ではその厚みを測定するときに誤差がさげられないことなどから考えて, 十分な精度である。

次に前節の音響インピーダンス計算式の妥当性を検討する。まず測定した各種の試料の中から,

$k$  の一番大きいものについて  $k, k_0$  と周波数の関係をしらべたのが第1表である。これからわかるように  $(k-k_0) < 0.1(\omega^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}$  は十分に成立つ。また  $\{(l-l')^2/4\}/l^2$  は 0.2% 以下であつて  $k$  を求めるときの仮定  $l'^2 + l''^2 = 2l^2$  も成立つている。

第1表  $k, k_0$  と周波数との関係

周波数 c p s	$k$	$k_0$	$k-k_0$	$(\omega^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}$
200	26.7	10.9	15.8	1250
250	38.7	11.8	26.9	1570
500	64.7	12.0	52.7	3140
750	77.6	13.8	63.8	4710
1500	106.8	19.5	87.3	9420
2000	148.5	24.1	124.4	12570

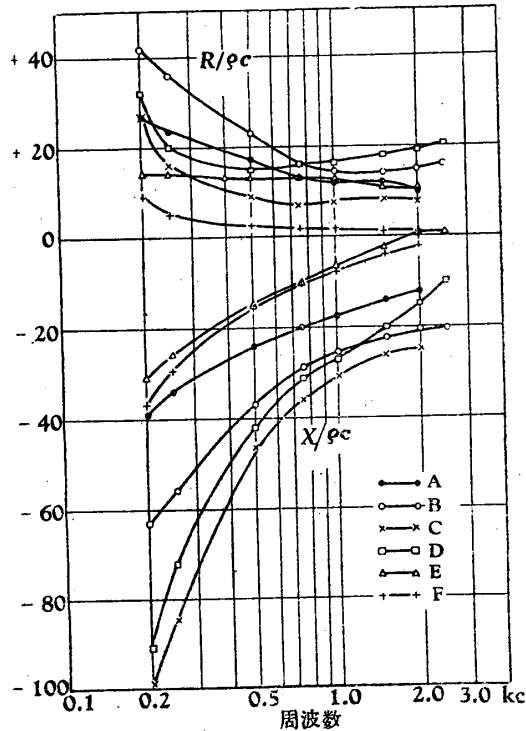
(2) 各種材料の音響インピーダンス

測定は市場に出ている各種の音響材料のうちから, テックス, ロックウール, グラスウール, フェルトなど計 14 種類について, すべて試料の後面が剛壁に密接した条件で行つた。測定した試料の詳細を第2表に示した。

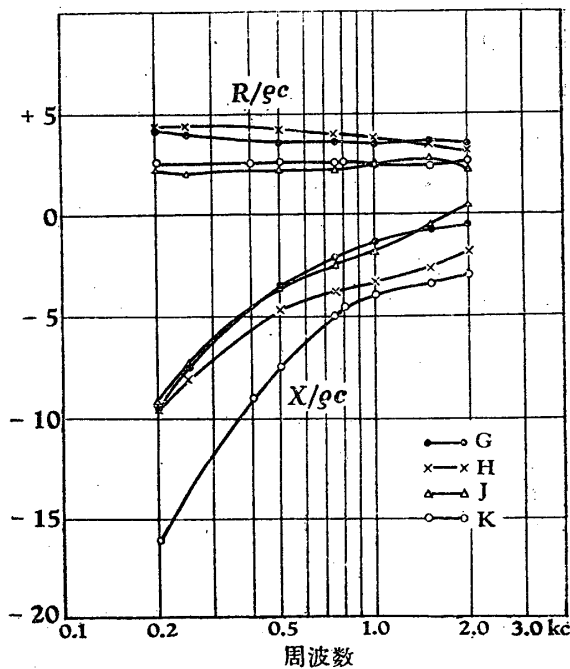
第2表 測定音響材料

試料記号	品 種	厚さ cm	密 度 gr. cm <sup>-3</sup>	
A	味の素吸音テックス(セミハード)	1.2	0.39	主原料藁, 孔の径 4.5 mm, 深さ 6.5 mm, 孔表面積 7.6 %
B	味の素吸音テックス(ハード)	0.9	0.43	A と同じ
C	味の素ハードテックス	0.9	0.45	孔なし
D	穿孔テックス	1.1	0.81	原料パルプ, 孔の深さ 4.5 mm, その他は A と同じ
E	"	1.0	0.37	主原料藁
F	"	1.6	0.81	原料パルプ, 厚さ 5 mm の穿孔部のうしろに 4 mm の空隙あり
G	ロックウール	2.5	0.33	
H	"	2.4	0.26	
J	" (孔あき)	2.5	0.28	孔の径 9 mm, 深さ 13 mm, 孔表面積 13.5%
K	"	1.2	0.50	
L	グラスウール	1.1	0.17	澱粉接着
M	" (孔あき)	1.9	0.31	ペイントナイト接着, 孔の径 4 mm, 深さ 10 mm, 孔表面積 6%
N	フェルト	1.4	0.20	
P	ミネラルフェルト	4.5	0.28	原料鈹滓

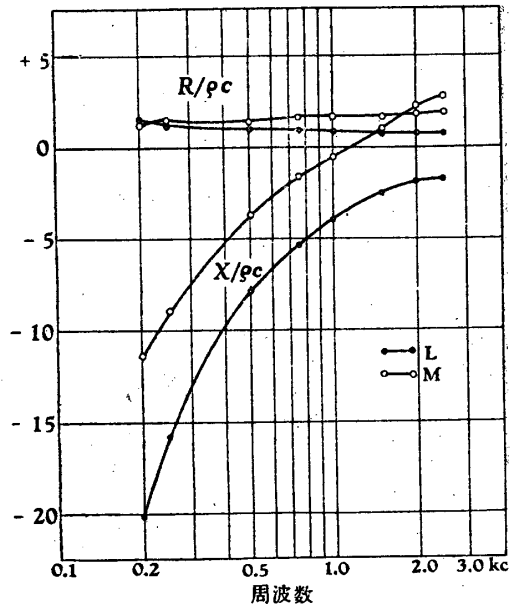
垂直音響インピーダンスは  $Z=R+jX$  としてその実数部分(抵抗)と虚数部分(リアクタンス)の、空気の音響抵抗  $\rho c$  との比  $R/\rho c$ ,  $X/\rho c$  によつて表すことにした。前表の各種材料の垂直音響インピーダンスの周波数特性の測定結果を種類別に示したのが第4図から第7図である。各図に記した試料の符号は第2表に示してあるものである。



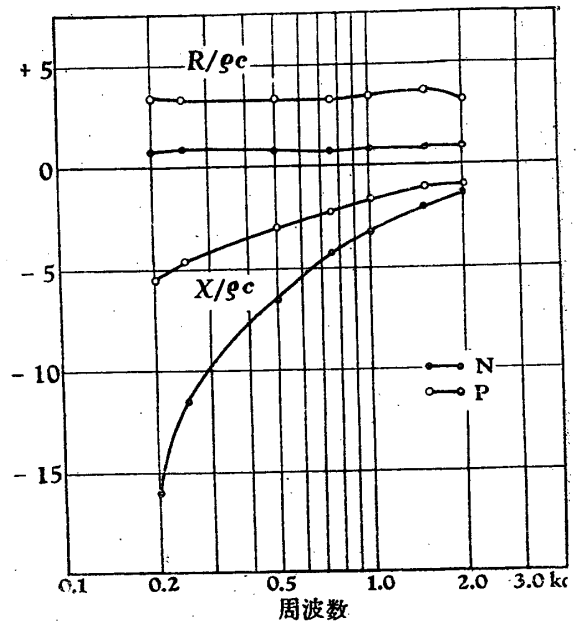
第4図 テックスの音響インピーダンス



第5図 ロックウールの音響インピーダンス



第6図 グラスウールの音響インピーダンス



第7図 フェルトの音響インピーダンス

この結果から音響材料の垂直音響インピーダンスの一般的傾向は次のように考えられる。

(i) 音響抵抗  $R/\rho c$  はテックス以外は周波数にほとんど無関係に一定である。テックスでは低音になるほど抵抗は増加する。

(ii) 音響リアクタンス  $X/\rho c$  は周波数に関係し、低音では負の値 (stiffness reactance) をとり、その絶対値は周波数が高くなるにつれて減少する。そして高音では正の値 (mass reactance) となるものもある。

(iii) テックスのような、堅い材料ではロックウールなどにくらべて、インピーダンスの絶対値

が非常に大きくなる。

§4. 吸音率の計算

垂直音響インピーダンス  $Z$  と任意の角度  $\theta$  で入射する平面波に対する吸音率  $\alpha(\theta)$  との関係は、すでに Paris<sup>(6)</sup> によつて次のように与えられている：

$$\alpha(\theta) = 1 - \left| \frac{Z \cos \theta - \rho c}{Z \cos \theta + \rho c} \right|^2 \quad (4)$$

$R/\rho c = r$ ,  $X/\rho c = x$  として (4) 式で  $\theta = 0$  とおけば、垂直入射吸音率  $\alpha_0$  は

$$\alpha_0 = \frac{4r}{(r+1)^2 + x^2} \quad (5)$$

となる。§3 の音響インピーダンスの測定結果から (5) 式によつて垂直入射吸音率を計算したのが第8図から第11図までである。

これらの材料の中の一部のものについて、定常波法および管内残響法で直接に垂直入射吸音率を測定した。その結果も同じ図に示してある。図からわかるように、この3つの方法で求めた吸音率

はかなりよく一致している。

random 入射吸音率の計算については、今日までいくつかの式が発表されている。Paris<sup>(7)</sup> によれば、さきの (4) 式を使つて

$$\alpha_{stat.} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (6)$$

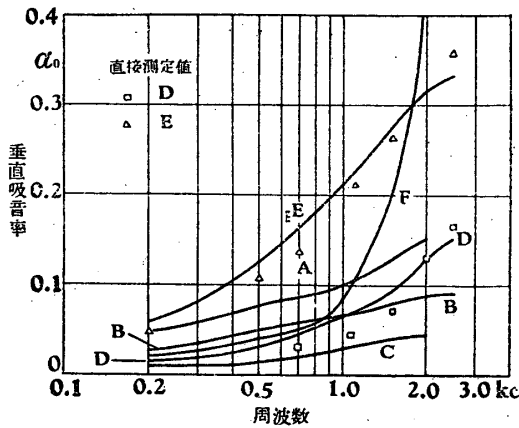
となる。また London<sup>(8)</sup> は (5) 式によつて計算した  $\alpha_0$  から

$$\alpha_0 = 1 - \left( \frac{Z_e - 1}{Z_e + 1} \right)^2 \quad (7)$$

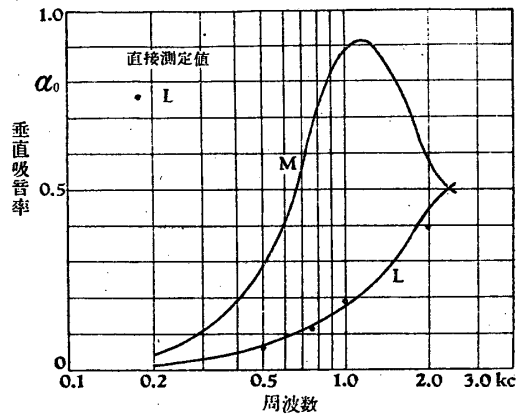
で求められる実数のインピーダンス  $Z_e$  を考えて、これを使つて吸音率は次の式で与えられるとしている。

$$\alpha_{stat.} = \frac{\int_0^{\pi/2} \left\{ 1 - \left[ \frac{Z_e \cos \theta - 1}{Z_e \cos \theta + 1} \right]^2 \right\} \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta} \quad (8)$$

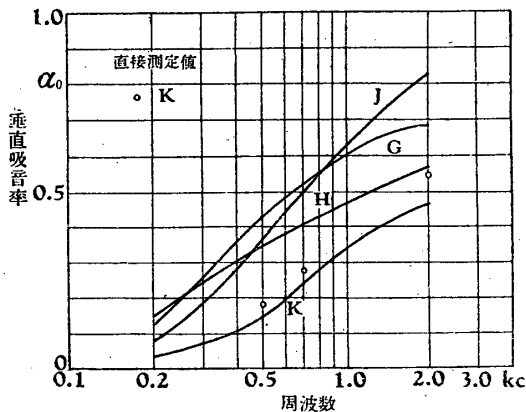
これらの式の中でどれが実際の random 入射吸音率を与えるものであるかは、現在の段階では



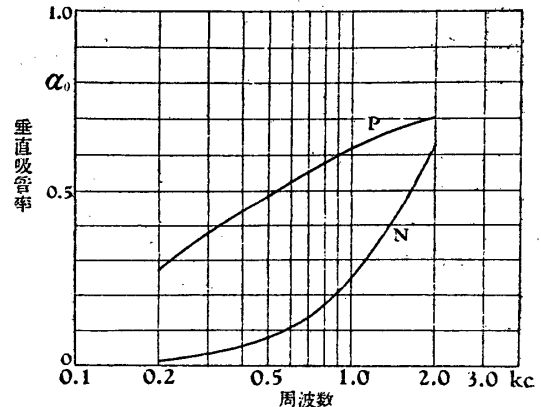
第8図 テックスの垂直吸音率



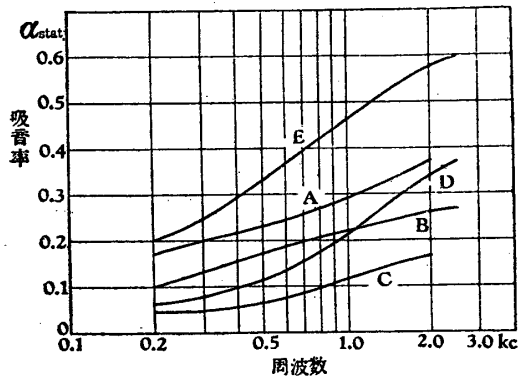
第10図 グラスウールの垂直吸音率



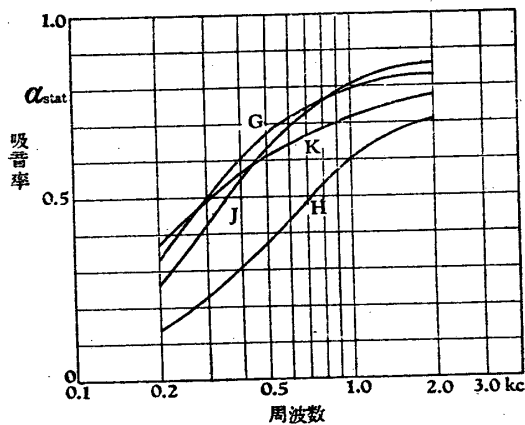
第9図 ロックウールの垂直吸音率



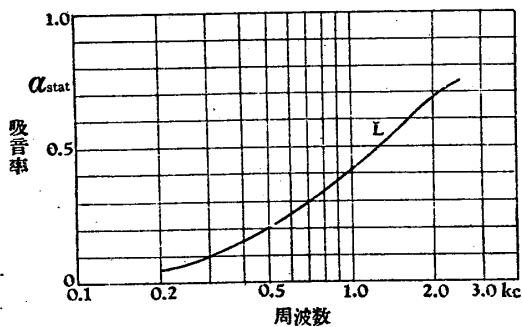
第11図 フェルトの垂直吸音率



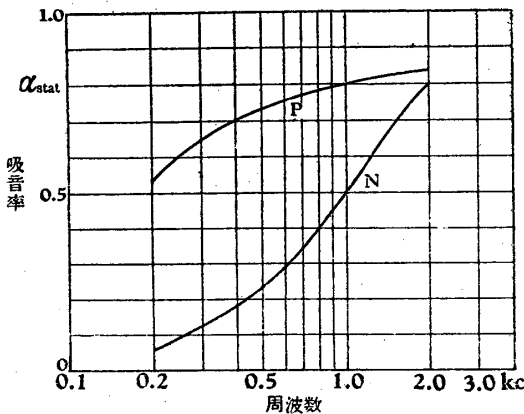
第12図 テックスの random 入射吸音率



第13図 ロックウールの random 入射吸音率



第14図 グラスウールの random 入射吸音率



第15図 フェルトの random 入射吸音率

決めることは出来ないが、有響室法による結果の不一致の程度から考えて普通の音響材料（垂直音響インピーダンスが入射角によつて変らないもの）については、これらの式のどれかを使つて random 入射吸音率の大体的見当をつけることができるものと思われる。それで我々の音響インピーダンスの測定結果から (8) 式によつて random 入射吸音率を計算してみた。その結果が第 12 図から第 15 図である。第 1 表の中で F および M の試料は、垂直吸音率の図からもわかるように、共鳴吸収を示すような構造である。このようなときには垂直音響インピーダンスの測定結果から、さきの (6) または (8) 式を使つて  $\alpha_{stat}$  を計算することはできないと考えられるので、この 2 種類の試料については random 入射吸音率は計算してない。

§5. むすび

音響材料の垂直音響インピーダンスを測定するために我々の使つた装置についてのべ、これによる現用各種材料の測定結果を示した。

この方法では試料面以外の管壁などによる損失や測定中の温度変化の影響も式の中に含まれており、また測定を共鳴の近くで行うために雑音などによる影響が少い。ただこれでは周波数を連続的に変えて測定することが不可能に近いので、特殊な材料では測定に不便を感じることもある。また吸音率の大きい場合の測定ができないので、ロックウールなどの厚いものや、綿類には適さない。これらの問題については現在他の方法で検討中である。尙この研究は主として文部省の科学研究費によるものである。

文 献

- (1) 例えば Leo L. Beranek: *Acoustic Measurements*, (1949), 302.
- (2) P. M. Morse and R. H. Bolt: *Rev. of Mod. Phys.*, **16** (1944), 87.
- (3) Leo L. Beranek: *J. Acoust. Soc. Am.*, **13** (1942), 248, **19** (1947), 556.
- (4) P. M. Morse and R. H. Bolt: *Rev. of Mod. Phys.*, **16** (1944) 100.
- (5) Leo L. Beranek: *J. Acoust. Soc. Am.*, **12** (1940), 3.
- (6) E. T. Paris: *Proc. Roy. Soc. London*, **A 115** (1927), 407.
- (7) E. T. Paris: *Phil. Mag.*, **5** (1928), 489.
- (8) A. London: *J. Acoust. Soc. Am.*, **22** (1950) 263.