



穴あき板ハニカム・サンドウィッチ構造体の吸音特性 (3)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 北海道教育大学 公開日: 2012-11-07 キーワード: 作成者: 竹内, 茂 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.32150/00002684

穴あき板ハニカム・サンドウィッチ構造体の吸音特性 (3)

竹 内 茂
北海道教育大学旭川分校物理学教室

Sound Absorption of Perforated Honeycomb Sandwich Panel Absorbers (3)

Shigeru TAKEUCHI

Physics Laboratory, Asahikawa College, Hokkaido University of Education,
Asahikawa 070

Abstract

The following experiments on sound absorption of perforated honeycomb sandwich panel absorbers were made :

1. Method of normal incident sound
2. Method of reverberant sound

In the method of normal incident sound by Eckhardt and Chrisler, the absorption coefficient α is given fundamentally by this formula

$$\alpha = 1 - \left[\frac{P_{max1} - P_{min1} + (P_{min2} - P_{min1})/2}{P_{max1} + P_{min1} - (P_{min2} - P_{min1})/2} \right]^2$$

in which P_{max1} is the maximum value of the primary pressure loop, P_{min1} the minimum value of the same, P_{min2} the minimum value of secondary pressure loop when the pipe contains a sample.

In the method of reverberant sound by S. Takeuchi, the absorption coefficient α' is given by the formula

$$\ln(1 - \alpha') = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{\tau'} \right)$$

in which l is the length of the pipe, c the sound velocity, τ' the decay time when the pipe contains a sample, τ the decay time when the pipe has the sample removed.

Figs. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, and 12, show the resonant frequency and the maximum absorption coefficient.

In general, the reverberant sound absorption coefficient becomes larger than the normal

incident one in the same sample.

Arrows show resonant frequencies calculated by the formula $f_0 = c/2\pi\sqrt{p/l'L_1}$ where p is the open area ratio, and l' is the effective thickness of the panel and L is the thickness of the honeycombed core.

Experimental values agree well with the theoretical results.

§ 1. 緒 言

先に発表した第一、二報¹⁾²⁾はハニカム・サンドウィッチ構造材料を定在波法或いは残響法により、中芯の厚さと吸音率、空気層厚と吸音率との関係、開口率の同じ場合や違う場合の吸音率の変化等を測定して発表した。この測定値は中々確定し難く残響法を例にとると同一材料でも残響室が違ふとその値が一致しない事があり、アメリカで F. G. Tyzzer と H. A. Leedy が³⁾ 1953~1954 年に 8 箇所の残響室で持回り試験を行った結果、測定値には約 10%~20%のずれがあった。そういう訳で現在 ISO の規格⁴⁾が出来て成る可く同一測定値が出るよう努力している。併し測定規準の違う定在波法と残響法とでは、その吸音率に於て大分相違があるようである。今回は同じ試料を定在波法及び残響法で測定した場合、どの様に吸音率の差があるかを多くの資料で考察して見たい。

§ 2. 理 論

i) 定在波法

オルソン理論⁵⁾によれば音波を完全に反射する剛壁面に平面進行波が投射されると、そこに定在波が発生する。この場合、音圧は壁面及び壁面より $n\lambda/2$ の点に於て 2 倍の大ききとなり（空気は音を吸収しないものとする）、壁面より $(2n-1)\lambda/4$ の点に於て 0 となる（但し、 λ =波長）。次に壁面が完全反射面でなく、振幅の $k\%$ を反射するものと考えれば、壁面より $n\lambda/2$ の点に生ずる最大圧力は

$$P_{max} = K(1 + \kappa) \quad (1)$$

となり $(2n-1)\lambda/4$ の点に生ずる最大圧力は

$$P_{min} = K(1 - \kappa) \quad (2)$$

となる。但し

P_{max} = 定在波圧力腹に於ける圧力

P_{min} = 定在波圧力節に於ける圧力

K = 常数

κ = 壁面よりの圧力反射率 (%)

式 (1) 及び (2) より k を求むれば

$$\kappa = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}} \quad (3)$$

となるが音響係数は定義に依り、吸収された音響エネルギーと投射された音響エネルギーの比であるから、吸音率 α は次式で与えられる。

$$\alpha = 1 - \kappa^2 \quad (4)$$

式 (3) 及び (4) より吸音率は

$$\alpha = \frac{4P_{max}P_{min}}{(P_{max} + P_{min})^2} \quad (5)$$

故に被測定材料と音源との間に定在波を作り、 P_{max} と P_{min} とを測定すれば、式 (5) を用いて吸音率を求める事が出来る。若し音響管の直径が小さい時は、管自身が音のエネルギーを吸収し、音波より距離が減少するにつれて増大する。本実験も内径 5 cm と 10 cm の管なので予備実験として音圧を管全体に亘って測定して見ると多分にこの傾向にあった。Eckhardt 及び Chrisler⁶⁾ はこれ等の場合を考慮し、一般に何等かの原因に依る吸音作用が管に沿って存在する場合、式 (5) の代りに用いる式として次式を与えている。

$$\alpha = 1 - \left[\frac{P_{max1} - P_{min2} + (P_{min2} - P_{min1})/2}{P_{max1} + P_{min1} - (P_{min2} - P_{min1})/2} \right]^2 \quad (6)$$

但し

P_{max1} = 探索管を次第に試料より遠ざける際、第一に現れる圧力腹の圧力

P_{min1} = 探索管を次第に試料より遠ざける際、第一に現れる圧力節の圧力

P_{min2} = 探索管を次第に試料より遠ざける際、第二に現れる圧力節の圧力

管に沿っての吸音作用が無視し得る時は、 $P_{min1} = P_{min2}$ となり式 (6) は式 (5) に一致する。本実験では前述の如く P_{min} が試料より遠ざかるに従って可成り上るので式 (6) を用ふる。

ii) 残響法

両端を閉じた管に音速 c の純音を入れると、その周波数 f が管の長さ l に対して

$$f = \frac{nc}{2l} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

のところで共鳴する。この状態で音をとめると管内の音は指数関数的に減衰する。その減衰の速さは管の内面での吸収の程度に関係する (これは原理的に残響室法と同様である)。今閉じた円管の一端に試料を取り付け、その反対側の端からスピーカーで音を入れる場合を考える。今管内での音の吸収は試料面だけでおこるとする。音をとめたとき音源から出た音は、それから t 秒間に試料面で $n = ct/(2l)$ 回の反射をする。試料の垂直入射吸音率を α_0 とすると、 t 秒後のエネルギー E_t は⁷⁾

$$E_t = E_0(1 - \alpha_0)^{2n} \quad (8)$$

そこで普通の場合と同様に 60 dB 減衰するまでの時間 T をとると

$$T = \frac{12l}{-c \log_{10}(1 - \alpha_0)} \quad (9)$$

で与えられる。この式から残響時間 T を測定すれば、試料の吸音率を求めることができる。たゞ実際には試料面以外の管壁でも吸収があり、残響時間にその影響が含まれている。本実験でもスピーカー側の壁の音の吸収を考え、残響時間の短い事も考慮して筆者の考察した¹⁾

$$\ln(1 - \alpha') = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{\tau'} \right) \quad (10)$$

を用いた。但し

α' = 試料を入れた場合の吸音率

τ = 試料を入れない場合、音圧が $1/e$ になる迄の減衰時間

τ' = 試料を入れた場合、音圧が $1/e$ になる迄の減衰時間

§ 3. 実験装置

実験装置は第1報で説明しており、大略同じであるが定在波法では Photo. 1 に示す如くブラウン管オシロスコープの代りにシンチロスコープを真空管電圧計に接続して画面に現れる波形から音圧の動向を知るに用いた。残響法では単掃引回路とオシロスコープの代りにビジグラフ 5 L 30 シリーズを使用した。これは Photo. 2 に示してあるが従来から親しまれて来たビジグラフの性能、操作面を大幅に改良した超高压水銀灯を光源とする直記式電磁オシログラフである。最高6チャンネルまでの現象を同時に記録できる振幅調整器内蔵タイプである。水銀灯式直記オシロでは光源に水銀灯を使用し、この光がガルバノメーターの振れのバネにつけたミラーで偏光して感光性の記録紙上に結合させ、記録像を得るものである。Photo. 8~9 は残響法によりホトグラフィックペーパーをビジグラフ内で記録した減衰曲線である。Photo. 3 の様に直流増巾器と組合せることによって、測定に適する振幅を自由に調整できる。サンプルの構造は Photo. 4 に示す如く表板はシナ3プライベニヤ板に穴をあけ、裏貼りは無穴の同板を用いて、それ等の中にセミケミカル紙ロール中芯を密着して挟んだサンドウィッチ構造体の円筒形を用いた。表板の穴は色々直径を変えて規則的な分布にして且粗密にあけ、中芯の高さも変化させた。Photo. 5 のサンプルの直径の大小はそれぞれ内径 10 cm と 5 cm の音響管に入れて測定した。一般の音響管の場合、普通の測定には直径数 cm から 10 cm の円形金属管を使用する事が多いが、吸音くさびや板状材料の測定などの特殊な用途には、一辺 20~30 cm の正方形断面をもった管が使われることがある。何れの場合にも、管壁の共振による損失を起さぬように出来るだけ肉厚の強い管がよい。また管の内壁は減衰の影響を減らすため、十分平滑に仕上げることが必要である。管の寸法は測定周波数範囲との関係から決められる。管内の音圧極小値は試料からの距離によって変化するから正確な測定には少なくとも二つの極小値を求めなければならない⁷⁾。この為には下限の周波数に対する波長を λ_l とすれば、 $3/4 \lambda_l$ 以上の長さが必要になる。これに対して管の断面寸法は測定の上限周波数をきめる。上限周波数 f_h は管の断面形にも関係するが一般に使われる円管では、管の直径 D に対して音速 C では

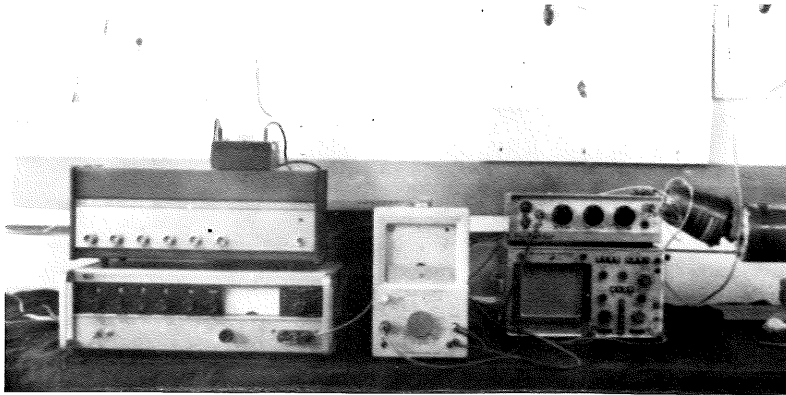


Photo. 1 Experimental apparatus of method of normal incident sound

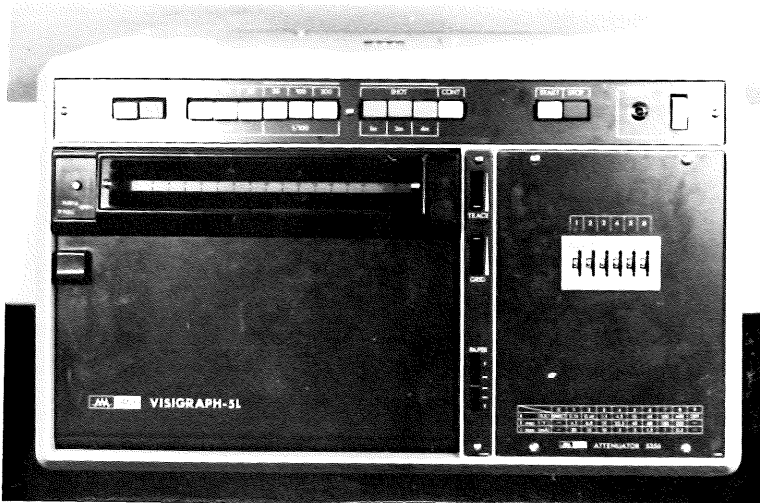


Photo. 2 Visigraph

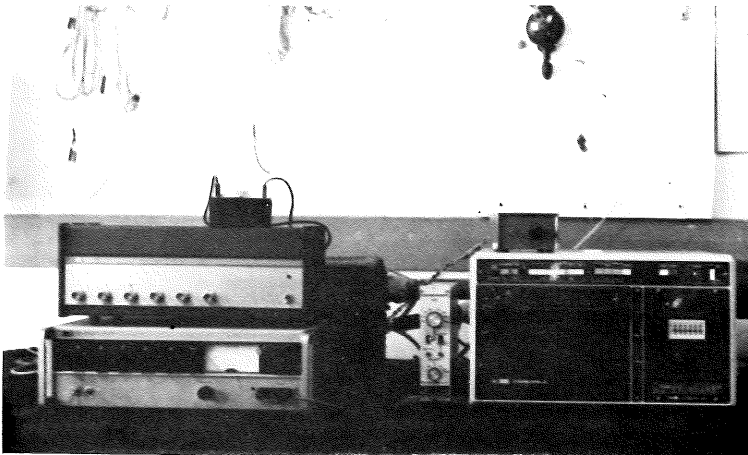


Photo. 3 Experimental apparatus of method of reverberant sound

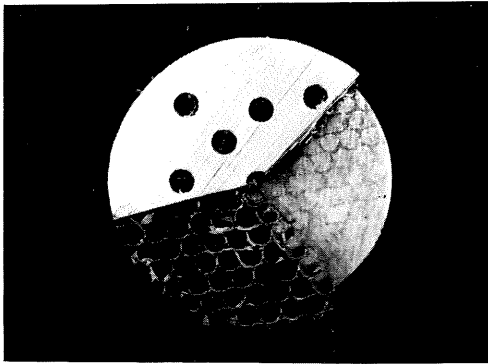


Photo. 4 Structure of sample

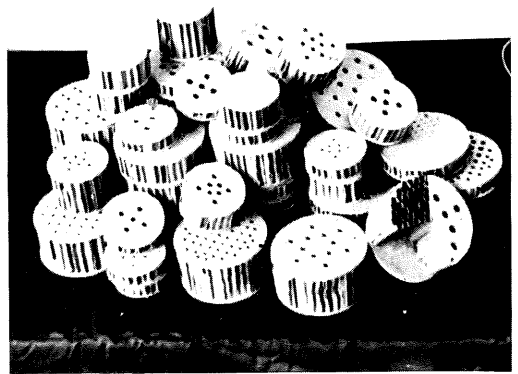


Photo. 5 Sample

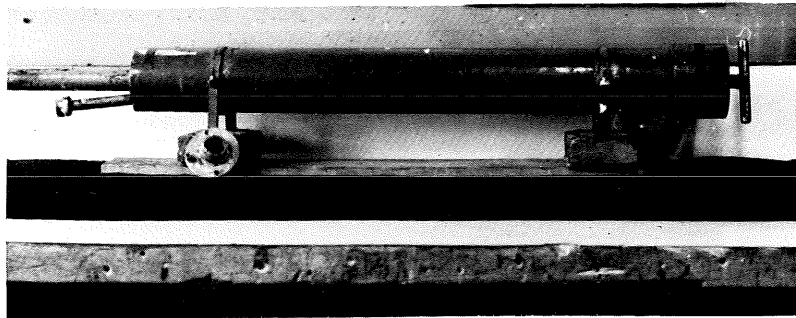


Photo. 6 Sound pipe (a)

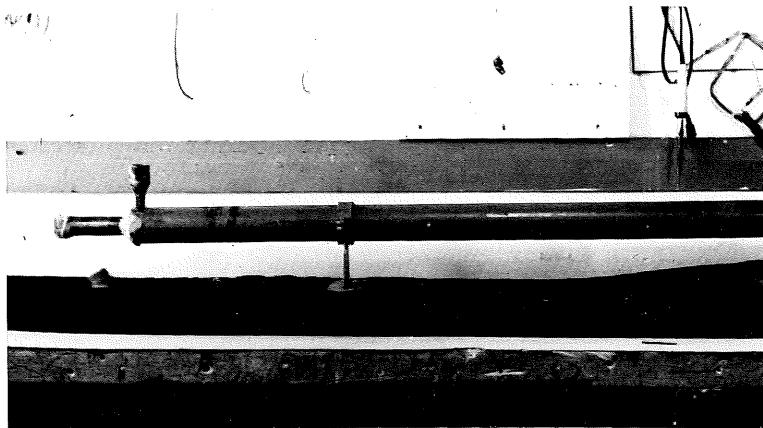


Photo. 7 Sound pipe (b)

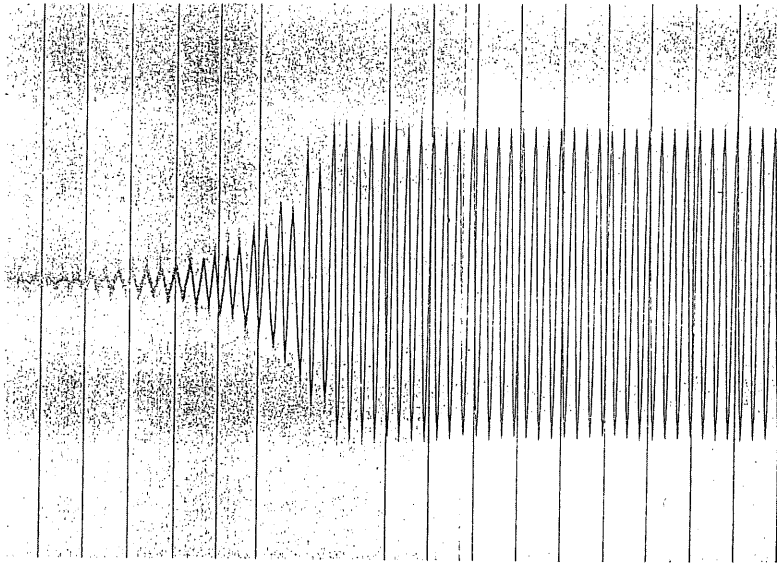


Photo. 8 Damped wave (a)
paper speed: 100 cm/s
timing: 1/100 s
frequency: 346.7 c/s

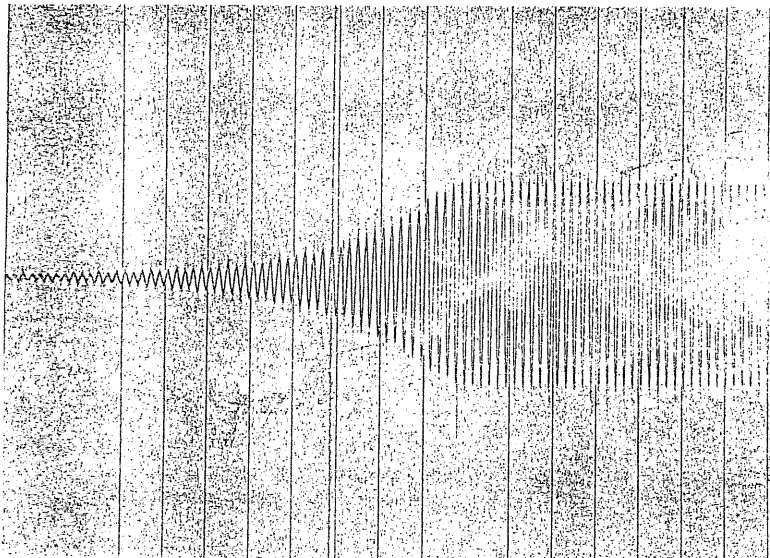


Photo. 9 Damped wave (b)
paper speed: 100cm/s
timing: 1/100 s
frequency: 682.4 c/s

$$f_h < \frac{c}{1.7D} \quad (11)$$

なる関係がある。これ等の関係から本実験では Photo. 6 の内径 10 cm の音響管 (a) は肉厚 1 cm, 長さ 100 cm として音の周波数は約 340 c/s から 2000 c/s 迄を測定し, Photo. 7 の内径 5 cm の音響管 (b) は肉厚 1 cm, 長さ 250 cm として, その周波数は約 2000 c/s 以上 4000 c/s 迄を測定した。

§ 4. 試験等の結果

Fig. 1 は板厚 4 mm, 穴径 3 mm, 中芯の厚さ 1.5 mm, 開口率 0.077 で定在波法では吸音率が高く 100% 近い値が出ていて, その周波数も理論値と一致するが残響法では 90% 位で理論値より少ない。周波数範囲を全般的に見て, 残響法の方が吸音率は高いが 1000 c/s から 2400 c/s 位までは定在波法に劣る。Fig. 2 は Fig. 1 のサンプルより穴数が増えて開口率が 0.142 になっただけの違いで, これも定在波法では最高の吸音率が 100% 近く, 残響法では 90% 位で両者共理論値の周波数と良く一致している。全般的に見て残響法の方が吸音率は高いが 1000 c/s から 3000 c/s 位迄は定在波法に劣る。Fig. 3 も Fig. 1 のサンプルより穴数が増えて開口率が 0.218 になっただけで, これは吸音率が小さくなり両測定法共, 最高で 60~70% 位の値となったが吸音率の最高は理論値の周波数と良く一致している。これは前と反対に全般的に見て吸音率は定在波法の方が高いが 340~900 c/s 位迄は残響法の方が少し高い。Fig. 4 は Fig. 1 のサンプルより穴径が大きく 8 mm になっただけで, 両測定法の吸音率の最高は 70~80% 位で, その周波数は略理論値と一致している。全般的に見て残響法の方が吸音率が高いが, 中央の 1300~1700 c/s 位では定在波法の方が大きい。Fig. 5 は Fig. 2 のサンプルと比較して, これも穴径が大きく 8 mm になっただけの違いである。両測定法の吸音率の最高は大きく約 90% から 100% の間であるが, その周波数は理論値の周波数より少し大きい。全般的に見て残響法の方が吸音率が高いが 1000~1900 c/s 位までは定在波法の方が大きい。Fig. 6 は Fig. 3 のサンプルと比較して穴径が大きく 8 mm になっただけの違いで両測定法の吸音率の最高は矢張 90% から 100% 位の間である。全般的に見て両測定法共吸音率が一致しているのが目立つが 3000~4000 c/s 位では残響法の方が大きい。Fig. 7 は Fig. 1 のサンプルと比較して中芯の厚さが大きく 30 mm になっただけの違いで定在波法の最高の吸音率は 95% 位であるが残響法では小さく 70% 位である。併しその周波数は理論値とは良く一致している。全般的に見て定在波法の吸音率が高いが 1900 c/s 以上位になると残響法の方が大きくなる。Fig. 8 は Fig. 2 のサンプルと比較して中芯の厚さが大きく 30 mm になっただけの違いで定在波法の最高の吸音率は 70% より少し小さく残響法では 30% より大きくその開きが大きい。只その周波数は理論値とは略一致している。全般的に見て両測定法は前半の 1300 c/s 位迄は比較的吸音率が一致しているが, 以後の 1800 c/s 位迄は定在波法の方が大きく, それを過ぎると残響法の方が大きくなる。Fig. 9 は Fig. 3 のサンプルと比較して中芯の厚さが大きく 30 mm になっただけの違いで残響法の最高の吸音率は 73% 位であり, その周波数は理論値より小さいが定在波法ではそれより 10% 位小さく周波数は略理論値と一致している。全般的に見て両測定法の吸音率は前半の 1000 c/s 位迄は良く一致しているがその後は乱れが多い。Fig. 10 は Fig. 4 のサンプルと比較して中芯の厚さが大きく 30 mm になっただけの違いであるが, 両図の吸音率の傾向は比較的類似している。定在波法の最高の吸音率

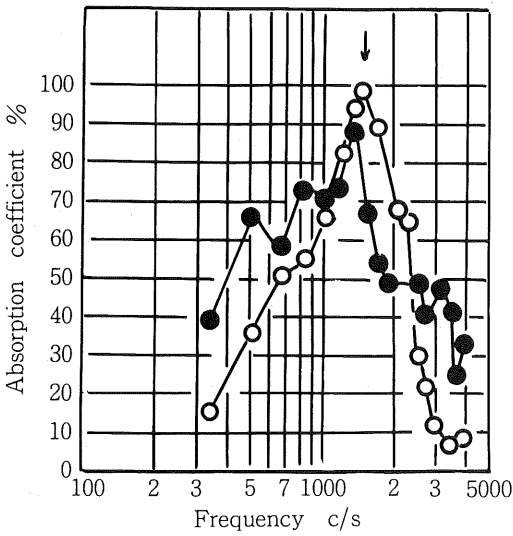


Fig. 1 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.077$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

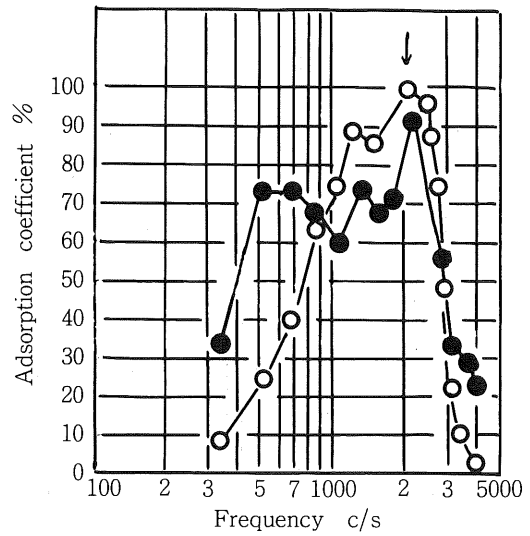


Fig. 2 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.142$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

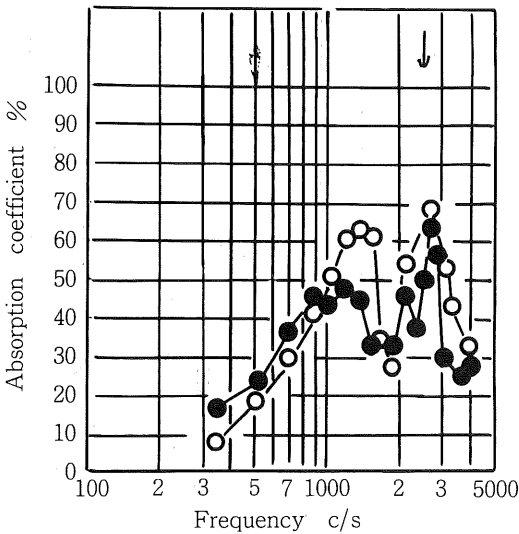


Fig. 3 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.218$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

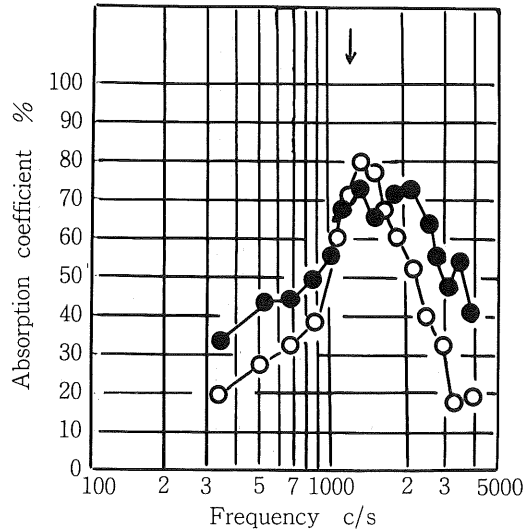


Fig. 4 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.077$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

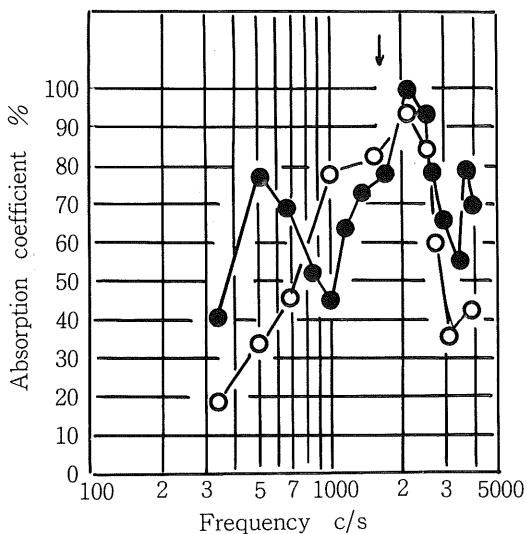


Fig. 5 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.142$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

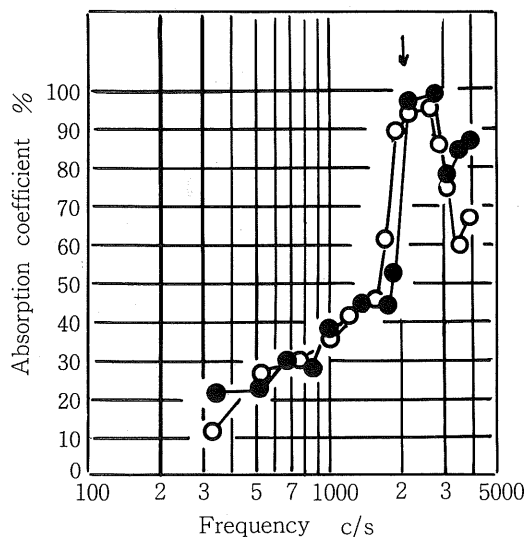


Fig. 6 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $p=0.218$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

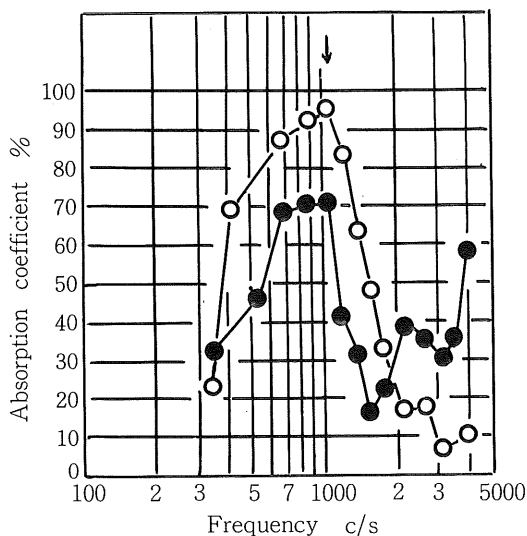


Fig. 7 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.077$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

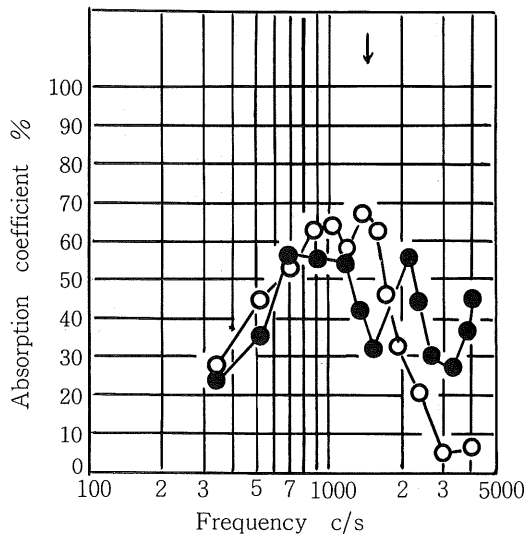


Fig. 8 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.142$). ●; α_{rev} , ○; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

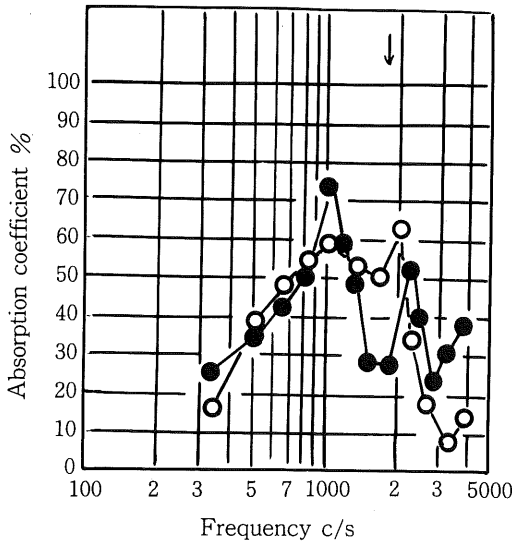


Fig. 9 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.218$). \bullet ; α_{rev} , \circ ; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

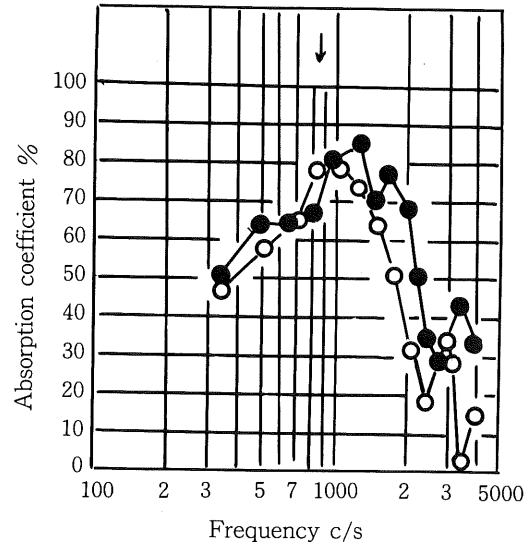


Fig. 10 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.077$). \bullet ; α_{rev} , \circ ; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

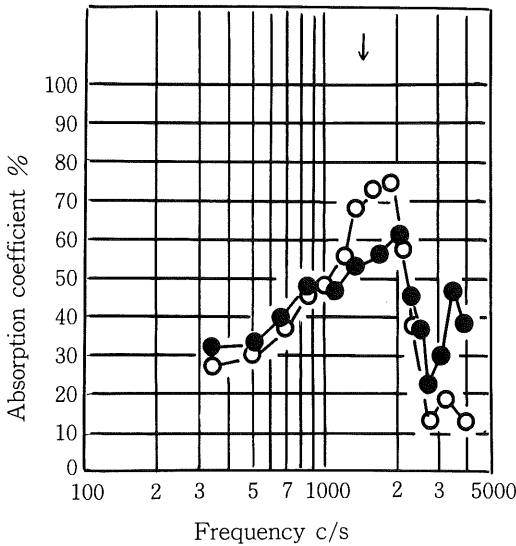


Fig. 11 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.142$). \bullet ; α_{rev} , \circ ; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

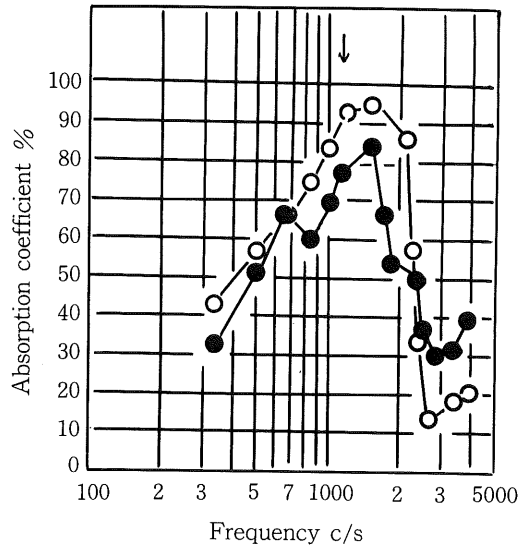


Fig. 12 Comparison of normal incident and reverberant sound absorption coefficient of the same perforated honeycomb sandwich panel absorber ($l=4\text{mm}$, $d=8\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $p=0.218$). \bullet ; α_{rev} , \circ ; α_o . Arrows show resonant frequencies calculated by Eq. (11).

は95%位で残響法ではそれより10%位小さいがその周波数は同じで理論値より少し大きい。一般的に見て両測定法の吸音率は略類似しているが、約1500 c/s以上で少し差がある。Fig. 11はFig. 5のサンプルと比較して中芯の厚さが30 mmになっただけの違いで定在波法の最高の吸音率は75%位であるが残響法では60%位であった。その周波数は理論値より少し大きい。一般的に見て吸音率は一致しているが大体1300~1900 c/s, 2800 c/s以上に於て両者の差がある。Fig. 12はFig. 6のサンプルと比較して中芯の厚さが大きく30 mmになっただけの違いである。定在波法の最高の吸音率は95%位であるが残響法ではそれより11%位小さい。両者の周波数は良く一致しているが理論値より少し大きい。一般的に見て曲線の傾向は類似しており吸音率も略一致している。

§ 5. 考 察

同じサンプルを定在波法と残響法での吸音率の測定結果は一部を除き多少の差はあるが、一般的な吸音特性の傾向は似ており、特に両測定法における極大値は略同一周波数上に現われた。図上の矢印は第1, 2報¹⁾²⁾に使用したHelmholtzの共鳴周波数 f_0 の理論式

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{l'L}} \quad (12)$$

を使用した。ここで c は音速、 p は表板の開口率、 l は中芯の厚さ、 l' は表板の穴の開口端補正を考へた実効的な板厚で枚厚を l 、穴径を d としたとき、普通 $l' = l + 0.8d$ で求めている。前述の如く一部の多少のずれを除いては良く式(11)で計算した値と一致しているのでサンプルの表板の穴の部分がHelmholtzの共鳴器の首に当り、内部の蜂巢状中芯の一つの空気層がその胴に相当して良く共鳴する事を示している。両測定法で共鳴周波数の最高の吸音率は定在波法の方が残響法より大きいものが多いが全域に亘っては残響法の吸音率が大きい。吸音特性の差異については定在波法では定常波の極大・極小を測定するのに対し残響法は密閉した管内での音の減衰時間を測定して吸音率を求めているため、測定時の音響管の状況により性質がそれぞれ異っているためと思われる。即ち式(10)の結果は

$$\alpha' = 1 - \exp \left\{ \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau'} \right) \right\} \quad (13)$$

となり残響法では上式の右辺の第2項で吸音率が決まり、定在波法も矢張、式(6)の右辺の第2項で決まるので、その間、音が密閉した管内から漏れたり、吸着エネルギーとして失われるとき、残響時間や極大・極小が変わり吸音率の差が出るものと思われる。

§ 6. 結 び

今回の研究は以前の私の研究¹⁾²⁾に続き同じサンプルで測定器機を変えて研究したものであるが、今後道民の生活の向上に伴い建築材料も高級なものを使用する傾向にあるので、表板はシナ3プライベニヤ板からプリント合板に切り換え、中芯もセミケミカル紙で作ったロール中芯の外に多孔質の吸音材料も挟んだサンドウィッチ構造体の吸音特性を研究したい所存なのである。只材質自体が不均一性なので測定値が中々決らずデータの不備な点も生ずるが、木材不足の折から、出来るだけ少ない原料で吸音率が良く比較的強固な建材の生産に、この試験の傾向が少しでも寄与出来れば幸である。

文 献

- 1) 竹内茂：北海道教育大学紀要，第二部，A，**21**，(1970) 1.
- 2) 竹内茂：北海道教育大学紀要，第二部，A，**25**，(1975) 2.
- 3) F. G. Tyzzer & H. A. Leedy J. A. S. A. 26, **651** (1954)
- 4) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック (技報堂，1966) p. 618.
- 5) 清宮博：オルソン応用音響学 (コロナ社，1977) p. 314.
- 6) Eckhardt and Chrisler : Bur. of Standards Sci. Paper **526**, (1926).
- 7) 日本音響材料協会：建築音響工学ハンドブック (技報堂，1963) p. 223.

