

建築用木材の部材化に関する研究 第3報

木質パネルの透過損失

鈴木正治⁽¹⁾・斎藤寿義⁽²⁾・田中俊成⁽³⁾

Masaharu SUZUKI, Hisayoshi SAITO and Toshinari TANAKA : Studies on
Wood-based Components for Prefabrication of Wooden House Report III
Sound transmission loss of wood-based panels

要 旨：木質系の壁は、枠組壁工法や各種のプレハブ住宅に用いられている中空壁パネルの構造が多い。その種類が豊富であるので、データの空白が目立ち、とくに、軽量壁では遮音性が低いといわれている。研究目的は、木質材料とそれによる壁パネルの遮音特性の把握とデータを補かんし、遮音設計に役立てることである。実大パネルの透過損失（遮音量）を測定するため、内側が吸音、外側が遮音構造の音源室を試作した。音源からの白色雑音を試験体に投射させ、透過した音の周波数分析を行ない、スペクトルの特性を調べた。主な結果は、各種の木質材料の透過損失は、質量則による理論値よりやや大であり、厚さと密度が大きいほど大きい。一般に、厚さ5~15mmの場合、500Hzの透過損失は20~25dBになり、とくに、ハードボード、パーティクルボードの遮音性がすぐれている。高音域の特定周波数で、ボードの屈曲振動がはげしく（コインシデンス効果）、音の透過が大きい。中空壁パネルは表板と骨組からなる2重壁である。一般に、この平均透過損失は27~35dBであるが、表板の種類や中空層の状態で変動する。2重壁の特長は、200Hzより1kHzにかけて、透過損失が著しく増大することであり、500Hzで30dB以上に達し、間仕切りとして十分な性能を示す。ただし、低音で共鳴現象があるので、薄い表板はさけるべきである。一方、2重壁の透過の損失を音波の減衰効果を考慮して理論で表わした。遮音性向上のため、中空層に吸音材を充てんしたり、3重壁の測定を行なった。その他、モルタル壁は比較的良好な遮音性を示しており、間伐材利用のあぜくら壁は音が透過しやすい。また、壁からの人声の透過の程度を感覚尺度で判定し、透過損失と対応させた。会話のもれが小さいほど、透過損失が大きくなった。

目 次

I 緒 言	96
II 実 験	96
1. 試 験 体	96
2. 遮音測定用音響室	100
3. 測 定 法	102
(1) 白色雑音による透過損失の測定	102
(2) 純音による透過損失の測定	102
(3) 聴取り試験	103
4. 予 備 実 験	104
III 結果と考察	105
1. ボード（1重壁）の透過損失	105
2. 壁パネルの透過損失	113
(1) 積層ボード	113
(2) 2重壁と3重壁	115

(3) ガラス繊維の充てん効果..... 121
 (4) 2重壁と3重壁の透過損失の理論..... 122
 3. 聴取り試験による不明瞭度..... 124
 IV 摘 要..... 127
 文 献..... 128
 付 表..... 129
 Summary 132

I 緒 言

室内の静けさは、窓、ドアの状態以外に、壁の材料と構造でさまる。プレハブ住宅の壁では、中空パネル型の木質構造が多い。これらは種類が多いので、データが少なく、遮音上の長短所も明らかでない。現実に、プレハブの種類によっては、遮音性が低いという評価も聞かれる。

この研究は、広範囲に木質系壁パネルの遮音のデータを出し、データの空白を埋め、木質系壁パネルの遮音の特徴を把握することを目標とした。あわせて、木質系壁の遮音性能向上の指針を得て、設計に役立てることを意図した。

実験には大型装置の試作から始め、6年を経た。この間、小林理学研究所の子安 勝、中村俊一、元日本ノボパン工業の藤田彰介、北新合板工業の山本昭夫らの諸氏、林業試験場の関係の人達のご援助とご教示を受けた。ここに深く感謝し、厚くお礼申し上げる。

文中の場所によって、同じ材料を材料学的呼び方あるいは音響学的呼び方を用いて、適切な表現にした。下にその参考例を示す。

材 料 学	音 響 学
木 質 材 料	1 重 壁, 板
パ ネ ル	1 重 壁
(木質パネル)	積 層 壁
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="margin-right: 5px;">ボ</div> <div style="margin-right: 5px;">ー</div> <div style="margin-right: 5px;">ド</div> </div>	2 重壁, 3 重壁
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="margin-right: 5px;">積</div> <div style="margin-right: 5px;">層</div> <div style="margin-right: 5px;">ボ</div> <div style="margin-right: 5px;">ー</div> <div style="margin-right: 5px;">ド</div> </div>	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="margin-right: 5px;">中</div> <div style="margin-right: 5px;">空</div> <div style="margin-right: 5px;">パ</div> <div style="margin-right: 5px;">ネ</div> <div style="margin-right: 5px;">ル</div> </div>	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="margin-right: 5px;">(木質中空パネル,</div> </div>	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="margin-right: 5px;">木質壁パネル)</div> </div>	

II 実 験

1. 試 験 体

試験体は、木質材料、その他の材料、これらの材料を用いて作製した壁パネルなどである。木質材料などボードの種類と大きさを Table 1 に示す。壁パネルの枠材にはスプルーの角材を用いた。枠は、Fig. 1 (a) に示したように、厚さは 4, 6, 8 cm の 3 種類にした。積層木の幅は 30 mm, 縦積と横積の間隔は 413, 570 mm である。この枠の両面に Table 1 の各種のボードをくぎづけして、中空の 2 重壁 (以下、2 重壁) を作製した。同 3 重壁は、枠 2 体に 3 枚のボードを交互にくぎづけしたものである。Fig. 1 (b) にその側面図を示す。また、Table 2 には、各種の構成の壁パネルを分類して示す。Table 2 の略記号の意味は注のようである。1 例を示すと、F4・GW とは、4 cm 厚さの木枠にガラス繊維マットを充てんした。マットは 42×57 cm², 重さは 175 g である。枠は 6 か所に仕切られ、2 重壁では 1 つの仕切

Table 2. 試 験 体 (中空壁パネル)
Specimen (hollow-core wall panels)

パネ ル Panels	大 き さ Size (mm)		重 さ Weight (kg)	パ ネ ル の 構 成 Construction of panel				
	T	W × L		Face	Core	Face	略 記 号 Sign	
合板パネル Plywood panel								
2重壁 Twofold wall	52	915×1,830	16.56	P 6	F 4*1	P 6	2 P 6-4 *3	
	72		18.96	"	F 6	"	2 P 6-6	
	92		21.13	"	F 8	"	2 P 6-8	
	52		18.75	"	F 4・GW*2	"	2 P 6-4 W*4	
	72		21.04	"	F 6・GW	"	2 P 6-6 W	
	92		23.24	"	F 8・GW	"	2 P 6-8 W	
	64		915×1,830	33.58	P 12	F 4	P 12	2 P 12-4
	84	36.14		"	F 6	"	2 P 12-6	
	104	38.23		"	F 8	"	2 P 12-8	
	64	35.64		"	F 4・GW	"	2 P 12-4 W	
	84	38.11		"	F 6・GW	"	2 P 12-6 W	
	104	40.33		"	F 8・GW	"	2 P 12-8 W	
	3重壁 Threefold wall	98		915×1,830	28.09	P 6	F 4・P 6・F 4*5	P 6
		98	30.19		"	F 4・GW・P 6 ・F 4・GW*6	"	3 P 6-4 W*8
116		915×1,830	52.53	P 12	F 4・P 12・F 4	P 12	3 P 12-4	
116			54.63	"	F 4・GW・P 12 ・F 4・GW	"	3 P 12-4 W	
パーティクルボードパネル Particleboard panel								
2重壁 Twofold wall		66	915×1,830	35.35	Pa13	F 4	Pa13	2 Pa13-4
	86	37.79		"	F 6	"	2 Pa13-6	
	106	40.15		"	F 8	"	2 Pa13-8	
	66	37.48		"	F 4・GW	"	2 Pa13-4 W	
	86	39.96		"	F 6・GW	"	2 Pa13-6 W	
	106	42.25		"	F 8・GW	"	2 Pa13-8 W	
3重壁 Threefold wall	119	915×1,830	59.05	Pa13	F 4・Pa13・F 4	Pa13	3 Pa13-4	
	119		61.15	"	F 4・GW・Pa13 ・F 4・GW	"	3 Pa13-4 W	
ハードボードパネル Hardboard panel								
2重壁 Twofold wall	50	915×1,830	23.08	H 5	F 4	H 5	2 H 5-4	
	70		25.32	"	F 6	"	2 H 5-6	
	90		27.63	"	F 8	"	2 H 5-8	
	50		25.16	"	F 4・GW	"	2 H 5-4 W	
	70		27.33	"	F 6・GW	"	2 H 5-6 W	
	90		29.73	"	F 8・GW	"	2 H 5-8 W	
3重壁 Threefold wall	95	915×1,830	37.36	H 5	F 4・H 5・F 4	H 5	3 H 5-4	
	95		39.46	"	F 4・GW・H 5 ・F 4・GW	"	3 H 5-4 W	
セミハードボードパネル Semihardboard panel								
2重壁 Twofold wall	64	915×1,830	29.86	SH12	F 4	SH12	2 SH12-4	
	84		32.40	"	F 6	"	2 SH12-6	
	104		34.52	"	F 8	"	2 SH12-8	
	64		31.92	"	F 4・GW	"	2 SH12-4 W	
	84		34.55	"	F 6・GW	"	2 SH12-6 W	
	104		36.62	"	F 8・GW	"	2 SH12-8 W	

Table 2. つづき (Continued)

パネ ル Panels	大 き さ Size (mm)		重 さ Weight (kg)	パ ネ ル の 構 成 Construction of panel			
	T	W × L		Face	Core	Face	略 記 号 Sign
3 重 壁 Threefold wall	116	915×1,830	47.84	SH12	F4・SH12・F4	SH12	3 SH12-4
	116		49.94	〃	F4・GW・SH12 ・F4・GW	〃	3 SH12-4 W
石こうボードパネル Plasterboard panel							
2 重 壁 Twofold wall	58	915×1,830	28.98	G9	F4	G9	2 G9-4
	78		30.94	〃	F6	〃	2 G9-6
	98		33.42	〃	F8	〃	2 G9-8
	58		31.10	〃	F4・GW	〃	2 G9-4 W
	78		33.22	〃	F6・GW	〃	2 G9-6 W
	98		35.54	〃	F8・GW	〃	2 G9-8 W
3 重 壁 Threefold wall	107	915×1,830	46.24	G9	F4・G9・F4	G9	3 G9-4
	107		48.37	〃	F4・GW・G9 F4・GW	〃	3 G9-4 W
パーティクルボード・石こうボードパネル Particleboard and plasterboard panel							
2 重 壁 Twofold wall	66	915×1,830	32.42	Pa13	F4	G9	Pa13・G9-4
	86		34.56	〃	F6	〃	Pa13・G9-6
	106		37.80	〃	F8	〃	Pa13・G9-8
	66		34.50	〃	F4・GW	〃	Pa13・G9-4W
	86		36.62	〃	F6・GW	〃	Pa13・G9-6W
106	39.94	〃	F8・GW	〃	Pa13・G9-8W		
合板・石こうボードパネル Plywood and plasterboard panel							
2 重 壁 Twofold wall	61	915×1,830	29.88	P12	F4	G9	P12・G9-4
	81		32.30	〃	F6	〃	P12・G9-6
	101		36.57	〃	F8	〃	P12・G9-8
	61		31.99	〃	F4・GW	〃	P12・G9-4W
	81		34.43	〃	F6・GW	〃	P12・G9-6W
	101		38.69	〃	F8・GW	〃	P12・G9-8W
外装モルタル壁 Exterior mortared finished wall	68	915×1,830	54.42	M10	F3,6 (See Fig. 1)	P12	2M10・P12-4

*1 F: 木枠 Wood frame, 4: 厚さ 4 cm 4 cm in thickness.

*2 F: 木枠 Wood frame 4: 厚さ 4 cm 4 cm in thickness, GW: ガラス繊維 Glass wool.

*3 2: 2重壁 Twofold wall, P6: 厚さ 6 mm の合板 Plywood of 6 mm in thickness, 4: 厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness.

*4 2: 2重壁 Twofold wall, P6: 厚さ 6 mm の木枠 Plywood of 6 mm in thickness, 4W: ガラス繊維を充てんした厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness filled with glass wool.

*5 F4: 厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness, P6: 厚さ 6 mm 合板 Plywood of 6 mm in thickness.

*6 F4・GW: ガラス繊維を充てんした厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness filled with glass wool, P6: 厚さ 6 mm の合板 Plywood of 6 mm in thickness.

*7 3: 3重壁 Threefold wall, P6: 厚さ 6 mm の合板 Plywood of 6 mm in thickness, 4: 厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness.

*8 3: 3重壁 Threefold wall, P6: 厚さ 6 mm の合板 Plywood of 6 mm in thickness, 4W: ガラス繊維を充てんした厚さ 4 cm の木枠 Wood frame of 4 cm in thickness filled with glass wool.

P12, Pa13, H5, SH12 G9: Table 1 参照 See Table 1.

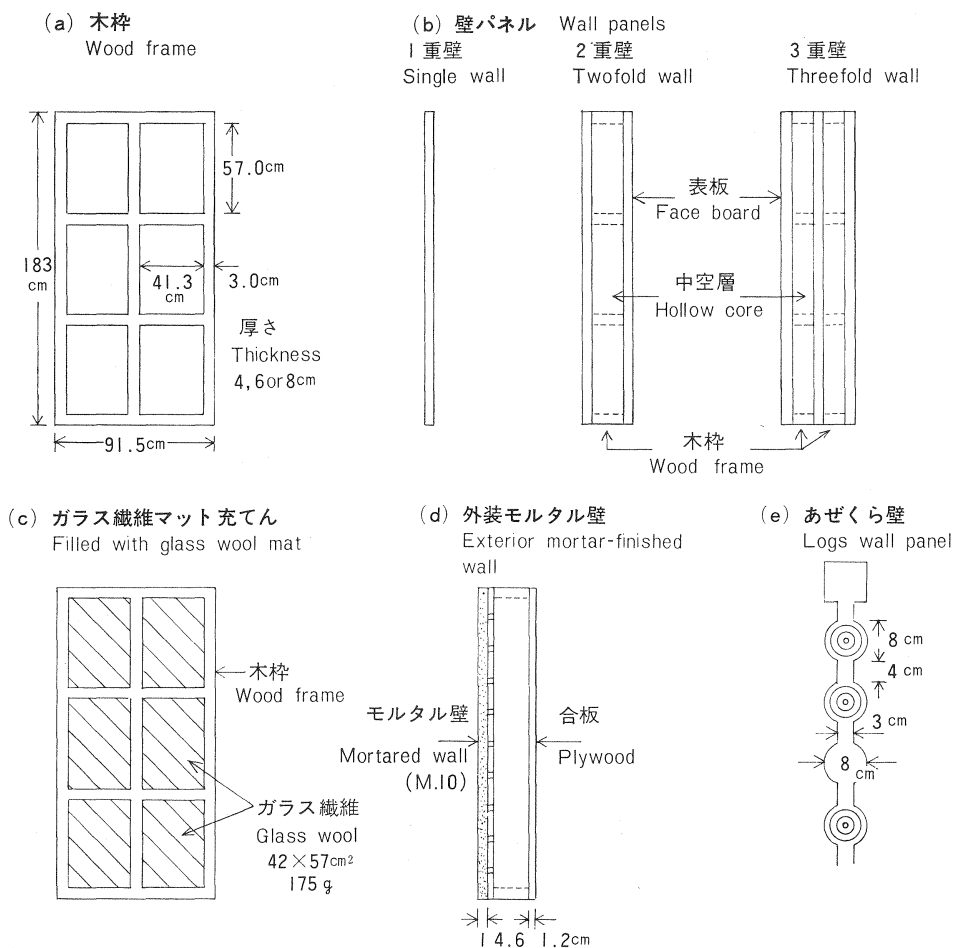


Fig. 1 試験体 Specimens.

2. 遮音測定用音響室

壁の遮音性の程度を示すのに透過損失 (TL) を用いる。透過損失は入射音のエネルギー E_i と壁を通過した透過音のエネルギー E_t のレベル比で示される。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{E_i}{E_t}$$

E_i , E_t を測定するには、残響室法によるのがよいが¹⁾²⁾、この実験では内側の吸音構造、外側を遮音構造の音響室を試作して、TL を測定した。

Fig. 2 は試験体を取りつけた音響室の側面図である。図示のごとく、2つの大きな箱の開口部を合わせたものである。大きさは、幅 1.70 m、長さ 2.65 m、高さ 2.74 m である。上部の高さ 1.34 m の部分が音源室、下部の高さ 1.40 m が受音室である。音源室はホイストで懸垂して移動できる。音源室は、音波がほぼ一様に試験体に投射され、2次以上の反射が少ないように工夫された、ガラス繊維と石こうボードの5重壁からなっている。受音室では、外部の騒音と固体振動の遮断と内部で透過音の反射を減ずるため、7層構造になっている。特に、遮音材料としてストラミットを用いているが、この平均透過損失が、

2重壁で 55 dB⁹⁾ であったので、これにさらに1重加えて、高性能の遮音壁にした。

この音響室を用いて、音源室にスピーカーを設置し、試験体がないときの音圧レベル L_0 (ブランクテスト) と試験体を取りつけたときの音圧レベル L を測定する。これを各周波数について調べ、レベル差 $L_0 - L$ が求める透過損失になる。透過損失を 40 Hz~10 kHz の間で平均して、平均透過損失 TL_{av} で表わした。

3. 測定法

(1) 白色雑音による透過損失の測定

Fig. 3 に示すように、測定機器を配置、接続した。試験体がないときの音源、受音両室の音圧レベルを測定するため、音源室のマイクロホンの出力電圧が常時 12 mV であるように、白色雑音のアンプを調節した。コンデンサマイクロホンを受音室の中央の、試験体とりつけ位置より 100 mm 下に固定して、白色雑音を受け、1/3 オクターブバンドフィルターで音の周波数分析を 40 Hz~10 kHz の範囲で行ない、レベルレコーダに音圧レベルとして記録した。次に試験体を取りつけ、上記と同一条件で試験体を透過した音の音圧レベルを記録した。

このほか、白色雑音のバンドレベルに -3 dB/Oct の傾斜特性をもたせたピンクノイズによる透過損失も測定した。

(2) 純音による透過損失の測定

白色雑音は低音から高音まで連続した音のスペクトルからなる。このため、板は多くの振動数の重畳した振動状態になると考えられる。一方、日常の現象として、特定の周波数またはオクターブの音の伝ばがあり、この音によって板の共鳴が起ることがある。これを実験的に確かめるため、正弦波発振器を用いて、音源側のマイクロホンの出力が 1 mV になるように、所定の周波数の純音を出し、白色雑音と同じ方法で音圧レベルを測定した。

ボードの振動状態を調べるため、試験体の音源側の表面の中央 (幅方向 45.5 cm, 長さ方向 91 cm の

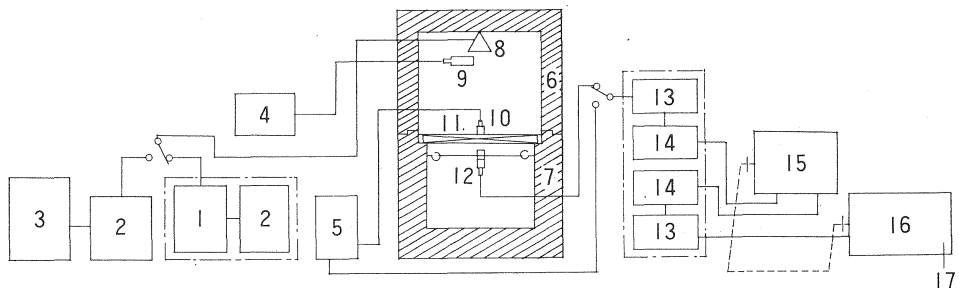


Fig. 3 遮音測定装置

Block diagram of equipment for measuring sound transmission loss.

- | | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1. 白色雑音発生器 | White noise generator | 10. 加速度ピックアップ | Pick-up for acceleration |
| 2. 電力増幅器 | Power amplifier | 11. 試験体 | Specimen |
| 3. 正弦波発振器 | Sine wave oscillator | 12. コンデンサマイクロホン | Condenser microphone |
| 4. 真空管電圧計 | Vacuum-tube voltmeter | 13. 電圧増幅器 | Voltage amplifier |
| 5. 加速度振動計 | Accelerometer | 14. アッテネーター | Attenuator |
| 6. 音源室 | Sound generating chamber | 15. 1/3 オクターブバンドフィルター | 1/3 Oct. band filter |
| 7. 受音室 | Sound receiving chamber | 16. レベルレコーダー | Level recorder |
| 8. ラウドスピーカー | Loud speaker | 17. 接 | 地 |
| 9. ダイナミックマイクロホン | Dynamic microphone | | |

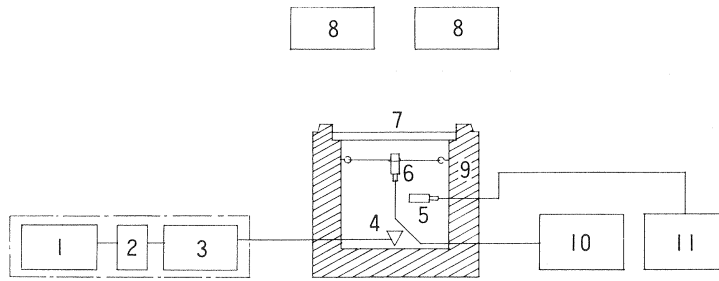


Fig. 4 聴取り試験のブロックダイヤグラム

Block diagram of hearing test.

- | | |
|---|--|
| 1. テープレコーダー Tape recorder | 6. ダイナミック マイクロホン
Dynamic microphone |
| 2. アッテネーター Attenuator | 7. 試験体 Specimen |
| 3. 電力増幅器 Power amplifier | 8. 試験位置 Hearing position |
| 4. ラウドスピーカー Loud speaker | 9. 音源室 Sound generating chamber |
| 5. コンデンサ マイクロホン
Condenser microphone | 10. 真空管電圧計 Vacuum-tube voltmeter |
| | 11. 騒音計 Sound level meter |

位置)に振動加速度測定用ピックアップをはりつけ、ボードの振動加速度をチャージアンプで増幅・指示させた。純音の周波数をかえて加速度を測定すると共に、加速度が極大または極小になる位置の周波数を1 Hz 程度のステップで細かく追跡した。

(3) 聴取り試験

標準的な試験である(1)に対して、住宅内の隔壁、事務所の間仕切では、話声の透過の大小が直接的に壁の遮音の尺度になる。(1),(2)で求めた透過損失を感覚的に意味づけることも含めて、Fig. 4で示した方法によって、話声の聴取り試験を行なった。受音室の底に置いたスピーカーから、小学生の討論会のスピーチを流す。聴取り者は2人で、受音室より約1.3 m離れた位置におり、スピーチの了解度と音節の明瞭度を判別する。この際、被験者(男性, 42歳, 29歳)には、スピーチの音量(Fig. 5)を8段階に無作為に変え、相互に独立して判定させた。

これとは別に、外部の騒音が壁を通して侵入したとき、室内の話が騒音の大きさや壁の種類によって、どの程度妨げられるかについて調べた。実験では、騒音に12 mV 出力の白色雑音を用い、室内の話には女性の天気予報を用いた。白色雑音によって、マスキングされるとき、天気予報の最小可聴音量を測定した。

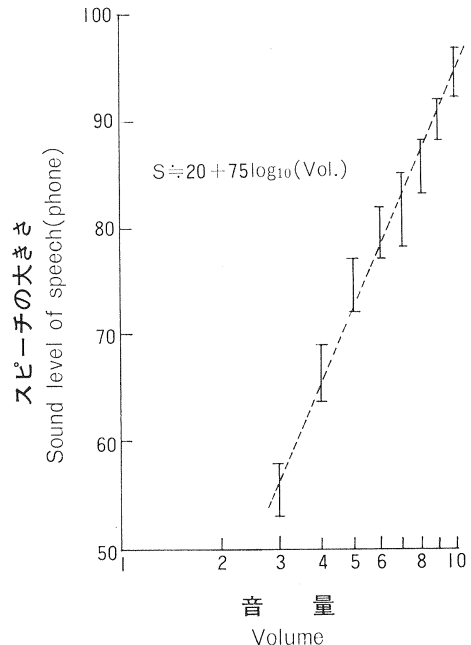


Fig. 5 テープレコーダの音量指示値とスピーチの大きさ(S)
Relation between the volume of tape recorder and sound level of speech (S).

4. 予 備 実 験

音響室の性能, 測定条件を調べるため, 受音室内部の音圧の分布, マイクロホンの適切な位置, コーキング効果について調査した。

受音室の周波数に対する音圧レベルの変動と平均値を Fig. 6 に示す。ただし, マイクの位置は図示した9か所で, それぞれ, 試験体より下方 100 mm のところである。1~5 kHz の間では, 音圧レベルの増加が小さく, 飽和する傾向がある。受音室の位置による変動は 5 dB 程度であり, 周波数に対する傾向は乱れているが, 同一場所の測定値は再現性がある。たとえば, マイクを中央 M に定めると, 音圧レベルの周波数変化が比較的なだらかで再現性があった。小林理研で測定された材料とほぼ同じ面密度の合板とパーティクルボードについて, 透過損失を測定すると, その周波数特性が比較的よく一致した。これから, 受音室の性能は 400 Hz 付近の肩部に注意すれば, 以下の実験に支障がないと判断した。マイクロホンと試験体の距離は, たとえば, 10 mm であると, 近すぎて, 局所振動の影響を受け, 透過損失が異常な値になるといわれている⁴⁾。このため, 試験体より 50 mm の位置で調べると, 受音室の隅角で, 音圧レベルの変動が大きくなり, 100 mm では, 先の隅角の影響が少なくなり, 実験に支障がないことがわかった。

試験体は, 固定枠を用いて 40 cm 間隔ごとにちょうネジでしめた。固定枠と受音室の試験体支持部との間げきに, Fig. 2 で示すように, ゴム粘土を充てんした。この目的は, ネジ止めによる枠の異常変形を防止すること, 固定枠と支持部との隙間をなくすためである。厚さの異なる試験体につき, コーキングの効果を調べると, コーキングによって, 平均 1 dB 程度の透過損失の増加が認められた。以下の実験で, 実験体の厚さ面(側面)に対して, 単位面積当たり, 約 12 g の粘土を充てんすることにした。

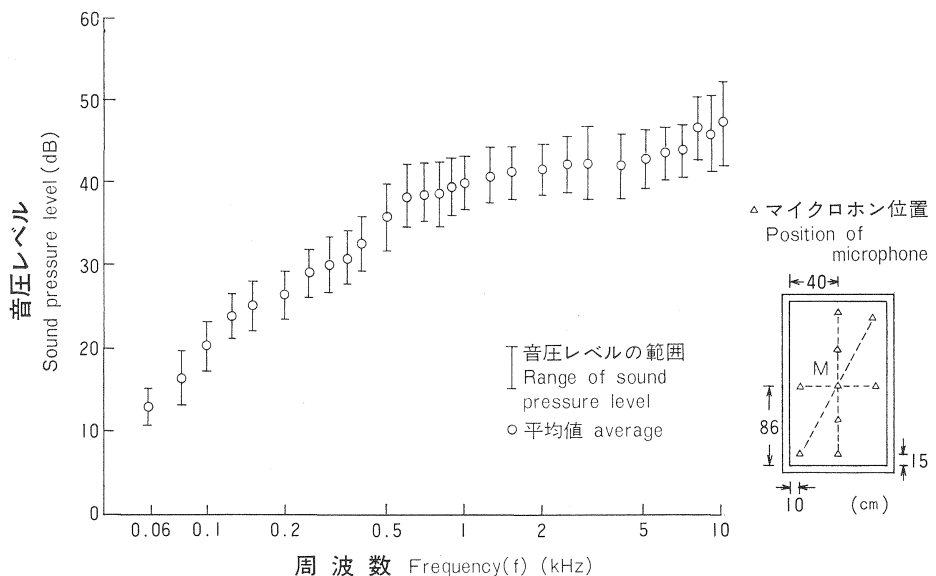


Fig. 6 音響室内の音圧レベルの分布

Distribution of sound pressure level in the acoustic chamber.

III 結果と考察

1. ボード (1重壁) の透過損失

ボードの透過損失 (TL と略す場合がある) の周波数特性の1例を Fig. 7 に示す。周波数の範囲を、低音 63~250 Hz, 中音 315~1,600 Hz, 高音 2,000~10,000 Hz に分けると、セミハードボードの TL は低・中音では、周波数に対して直線に近い増加を示す。高音で極端な減少があり、8 kHz 付近で、再びもとの直線の延長線上まで回復する。

板材料の透過損失の周波数特性は既に理論的に質量則が誘導されている。板面に対して、垂直入射波の透過損失 TL_0 の質量則は、 ω : 角振動数, m : 面密度 (g/cm^2), ρ' : 空気の密度 (g/cm^3), C : 音速 (cm/sec) とすると、

$$TL_0 = 20 \log_{10} \frac{\omega m}{2\rho' C} \quad (1)$$

となる⁵⁾。これから TL_0 は ω または m に比例する。ボードの比重を ρ , 厚さを t (cm) とすると、 $m = \rho t$ であるので、 TL_0 は t にも比例する。板面に乱入射する実際の音波については、(1) 式が拡張され、次式が誘導された。

$$\overline{TL} = (TL_0) - 10 \log_{10} [0.23 (TL_0)] \quad (2)$$

(1) 式および (2) 式によって、Fig. 7 のセミハードボード (面密度 $M=7.38 \text{ kg/m}^2$) の TL を計算して同図に示した。また、2.5~5 kHz の実測値を除いて実験式を求めた。 f を周波数とすると、

$$TL_E = 14.64 \log_{10} f - 16.42 \quad (3)$$

となる。この結果、 $TL_0 > TL_E > \overline{TL}$ の関係になり、各周波数での実測値は \overline{TL} より少し大きい。他の木

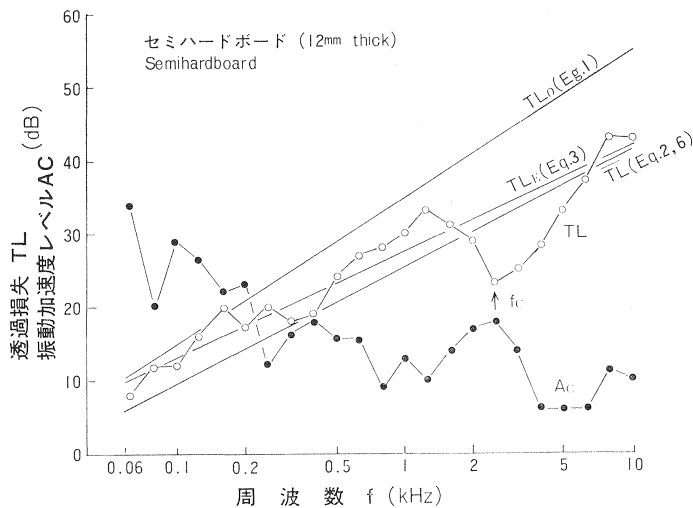


Fig. 7 周波数に対する透過損失と振動加速度レベル

Transmission loss (TL) and vibrational acceleration level (Ac) against frequency (f).

f_c : 限界周波数 Critical frequency; TL_0, \overline{TL} : 理論式 Theoretical formula, TL_E : 実験式 Empirical formula, 振動加速度レベル (Ac) = $20 \log_{10} n \cdot G / 0.001 \cdot G$, n : 測定値 Measured value, $G=980 \text{ cm/sec}^2$.

質材料でも同じ現象が認められるので、後述のごとく TL を fM に対してプロットし、整理することにした。

高音での特定周波数における TL の減少は、ボードがその周波数ではげしく屈曲振動を生じるためであり、この現象は音響学の分野で、板における波動の伝搬速度と入射波の音圧分布から導かれたコインシデンス効果の理論によって説明できる。この周波数が f_c (限界周波数) と呼ばれる。Fig. 7 のごとく、 f_c の前後では TL が谷のように低下して音を透過させる。 f_c は、 C : 音速、 h , ρ , E : 板の厚さ、密度、ヤング率とすると、

$$f_c = \frac{C^2}{2\pi h} \cdot \sqrt{\frac{12\rho}{E}} \quad (4)$$

で計算できる⁶⁾。Table 3 のセミハードボードの動的曲げヤング率を用いて、 f_c の計算例を示すと、 $h=1.2$ cm, $\rho=0.615$, $E=2.81 \times 10^{10}$ dyn/cm² であるから、 $f_c=2.48$ kHz (Fig. 7 の矢印) となって、実測値とよく一致する。板の振動状態を振動加速度の測定から調べ、図に表わした。測定加速度を $n \cdot G$ とすると、 $0.001 \cdot G$ を基準にして、対数レベル $AC = \log_{10} n \cdot G / 0.001 \cdot G$ で示した。コインシデンス効果の現われる周波数で、加速度の増大が認められ、板の振動がはげしいことがわかる。この測定は各周波数で音圧一定の純音を用いたものである。

厚さが h_1 , h_2 のように異なるが、 E と ρ は同じとき、その f_c をそれぞれ f_{c1} , f_{c2} とおくと、(4) 式より次式が導かれる。

$$f_{c2} = f_{c1} \cdot \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

Fig. 8 に、厚さの異なる合板のコインシデンス効果による TL の減少位置と振動加速度の関係を示す。厚さが 2 倍になると、 f_c が約 1/2 になって、(5) 式の関係を実験的に満足する。Table 3 に示されるように、厚さ 2.7, 3.7, 5.6, 11.8, 20.8 mm の各合板の比重とヤング率はそれぞれ異なっている。しか

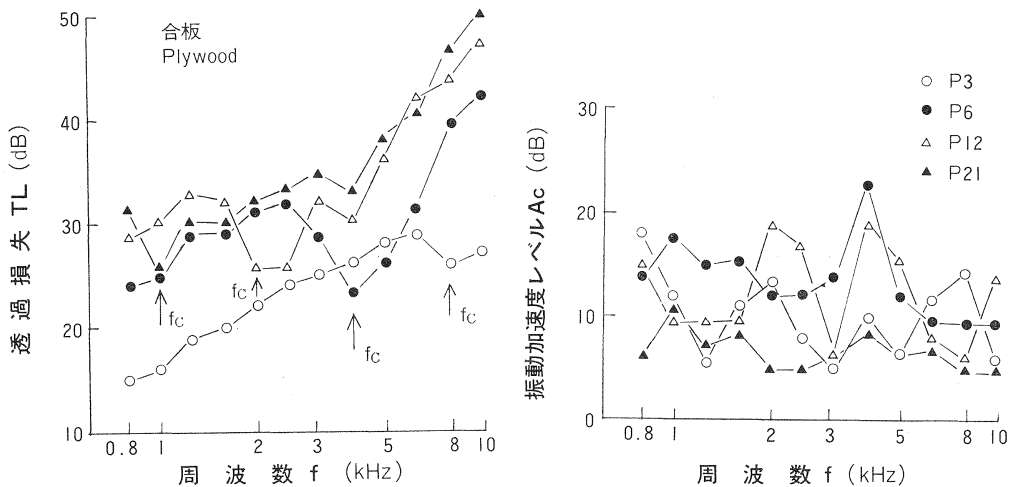


Fig. 8 周波数に対する透過損失、振動加速度レベル
Transmission loss (TL) and vibrational acceleration level (Ac) against frequency (f).

P3, P6, P12, P21 : see Table 1 ; f_c : 限界周波数 Critical frequency

Table 3. ボードの動的ヤング率と限界周波数
Dynamic Young's modulus and critical frequency of boards

材 料 Materials	厚 さ Thickness (mm)	比 重 Specific gravity	動 的 ヤ ン グ 率 Dynamic Young's modulus ($\times 10^{10}$ dyn/cm ²)			限界周波数 Critical frequency (kHz)
			長さ方向に平行 Parallel to length	長さ方向に直角 Perpendicular to length	平 均 Average	
合 板 Plywood	2.7*1 [21 : 57 : 22]	0.495	5.76~5.83	2.94~2.97	4.37	7.85
	3.7 [23 : 53 : 24]	0.500	7.08~7.31	3.30~3.33	5.25	5.30
	5.6 [15 : 70 : 15]	0.610	5.5 ~7.2	2.93~3.84	4.85	4.02
	11.8 [6:29:29:29:7]	0.631	4.12~4.71	5.85~6.66	5.34	1.90
	20.8 { }*2	0.596	4.46~4.51	6.02~6.28	5.32	1.02
パーティクル ボード Particleboard	12.8	0.688	2.57~2.89	2.79~2.91	2.78	2.48
	15.2	0.697	2.90~3.02	3.30~3.37	3.15	1.96
	20.2	0.681	3.19~3.28	3.62~3.66	3.44	1.40
ハードボード Hardboard	3.9	0.996	5.62~6.64	5.44~5.95	5.82	6.73
	4.9	1.047	6.60~7.67	5.23~7.12	7.02	4.91
セミハードボード Semihardboard	12.0	0.615	2.50~2.93	2.71~3.09	2.81	2.48
	15.0	0.623	2.38~2.73	2.54~2.82	2.62	2.08
石こうボード Plasterboard	8.7	0.776	2.84~2.86	1.23~1.60	2.33	4.22

*1 構成比 Proportion (%)

*2 [4 : 14 : 10 : 16 : 12 : 16 : 10 : 14 : 4]

し、 ρ/E は上記の順序で、0.113, 0.095, 0.118, 0.112 であり、この程度の相違は、音響実験では無視して、同じとみてよいのであろう。

その他の木質材料でも、測定値は異なるが、Fig. 7, 8 と同様な傾向になるので、各材料別の説明を省略して、全体について次のようにまとめることにした。なお、スプルース板など特殊なボードの限界周波数は正確に求められないので、Table 3 より省略した。

(1) 式を整理して、周波数 f 、面密度 M を、Hz, kg/m² で示すと、

$$TL_0 \approx 20 \log_{10} fM - 42.5 \tag{6}$$

となる。すなわち、 TL_0 は変数 (fM) の対数関数になる。Fig. 9 は供試した各合板について、 fM に対する TL の実測値をプロットしたものである。実線は fM に対する理論値 \overline{TL} である。この図から、 $(fM) < 10^4$ と $(fM) > 10^4$ の2つの領域では、 TL の分布が異なるのがわかる。 $(fM) < 10^4$ では、 \overline{TL} より実測した TL が大きい。また、厚さが 2.7 mm, 4.0 mm の合板は、5.6 mm, 12 mm の合板より TL が小さい傾向がうかがえる。このように、横軸を fM にとって、 TL から面密度 M の効果を消去しても、厚いものほど TL が大きくなるのは、 f と TL の関係と同じ現象といえる。すなわち、 f と M のほかに、さらに他の要因が TL の大きさに影響しているといえる。

一方、厚さの異なるパーティクルボードでは、Fig. 10 に示すごとく、実測値は \overline{TL} にだいたい一致し、厚さによる差はないようである。Fig. 11 のハードボードでは、 \overline{TL} との差は、 $fM = 10^3$ で 4 dB、

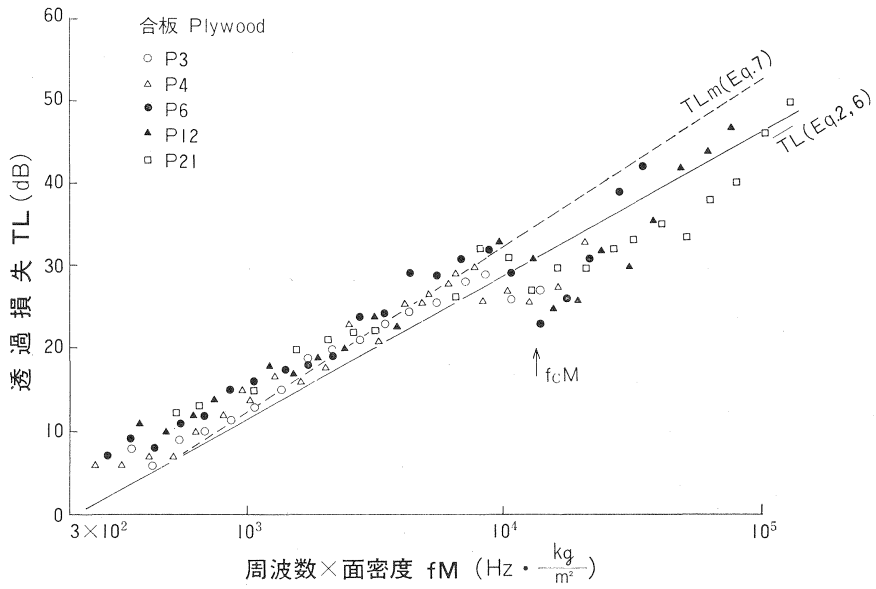


Fig. 9 周波数×面密度に対する合板の透過損失
Transmission loss (TL) of plywood against frequency \times area density (fM).

P3, P4, P6, P12, P21 : see Table 1 ; \overline{TL} , TL_m : 理論式 Theoretical formula ; f_cM : 限界周波数×面密度 Critical frequency \times Area density

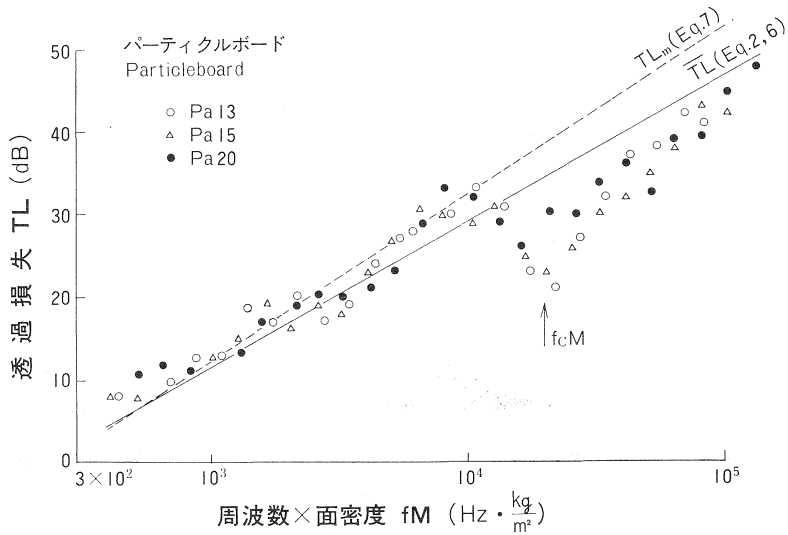


Fig. 10 周波数×面密度に対するパーティクルボードの透過損失
Transmission loss (TL) of particleboard against frequency \times area density (fM).

Pa13, Pa15, Pa20 : see Table 1 ; \overline{TL} , TL_m , f_cM : Fig. 9 参照, same as Fig. 9.

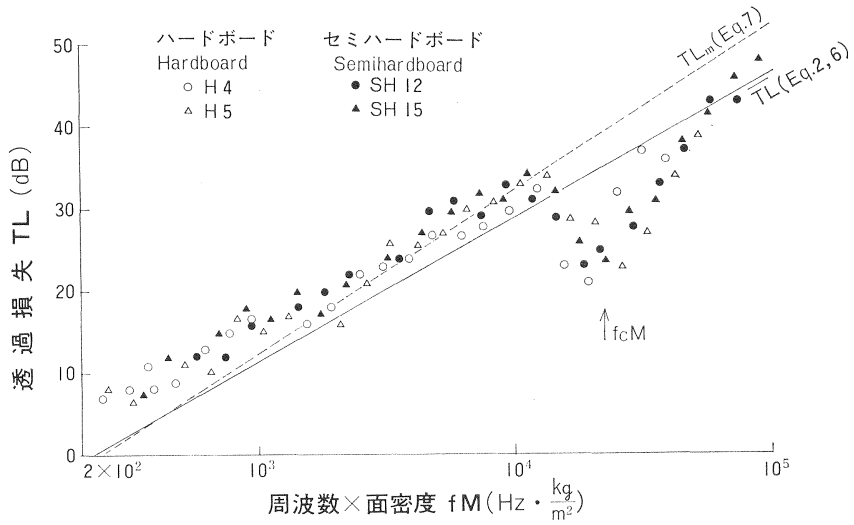


Fig. 11 周波数×面密度に対するファイバーボードの透過損失
Transmission loss (TL) of fiberboard against frequency × area density (fM).

H 4, H 5, SH 12, SH 15 : see Table 1 ; \overline{TL} , TL_m , fcM : Fig. 9 参照, same as Fig. 9.

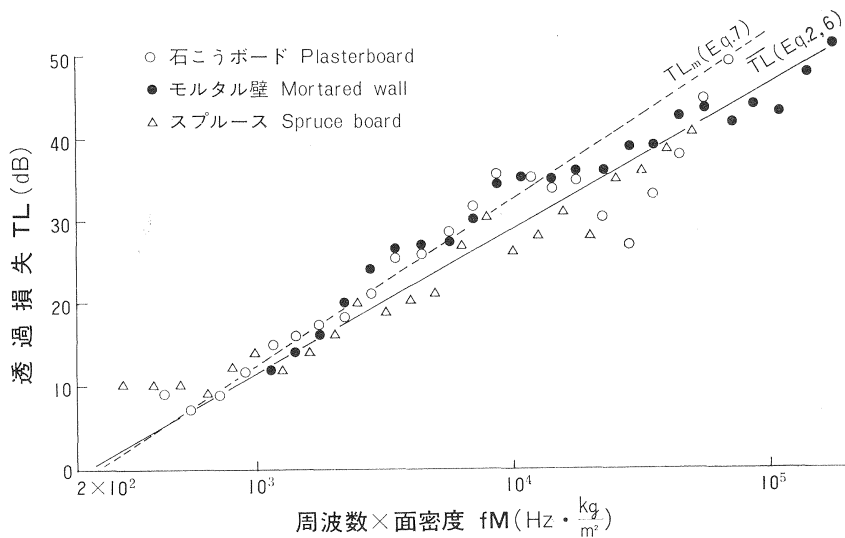


Fig. 12 周波数×面密度に対する透過損失
Transmission loss (TL) against frequency × area density (fM).

\overline{TL} , TL_m : Fig. 9 参照, same as Fig. 9.

Table 4. 実験式の係数
Coefficients of empirical formulae ($TL=b \log fM-a$)*

材 料 Materials	厚 さ Thickness (mm)	b	a	fM の範囲 Range of fM ($\times 10^3$)	b	a	fM の範囲 Range of fM ($\times 10^4$)
合 板 Plywood	2.7	15.75	-33.25	0.4~9	24.44	-76.21	1.4~10
	4.0	16.31	-35.04	"	"	"	"
	5.6	16.12	-32.87	"	"	"	"
	12.0	15.86	-32.03	"	"	"	"
	21.0	15.28	-30.02	"	"	"	"
パーティクルボード Particleboard	12.7	17.31	-38.70	0.3~12	24.13	-77.67	2~10
	15.2	16.66	-36.74	"	"	"	"
	20.2	17.75	-40.28	0.5~12	"	"	"
ハードボード Hardboard	3.9	14.39	-27.57	0.3~12	35.00	-126.51	2~10
	4.9	16.29	-33.46	"	"	"	"
セミハードボード Semihardboard	11.9	16.49	-33.56	0.4~12	35.00	-126.51	2~10
	14.8	16.10	-31.74	"	"	"	"
スプルース板 Spruce board 石こうボード Plasterboard モルタル壁 Mortared wall	11.4	11.96	-23.0	0.4~12	20.68	-56.92	1~5
	8.7	21.77	-52.85	0.5~12	51.18	-199.70	3~7
	10	22.46	-55.46	1~12	11.14	-10.80	1~20

* 注 Note TL : 透過損失 Transmission loss (dB),
 f : 周波数 Frequency (Hz),
 M : 面密度 Area density (kg/m^2).

Table 5. 実験式の係数
Coefficients of empirical formulae ($TL=b' \log f+a'$)*

材 料 Materials	厚 さ Thickness (mm)	b'	a'	f の 範囲 Range of f (Hz)
合 板 Plywood	2.7	15.75	-31.20	300~6,300
	4.0	16.31	-30.00	200~4,000
	5.6	16.12	-24.22	100~2,500
	12.0	15.86	-18.04	63~1,000
	21.0	15.28	-13.14	40~700
パーティクルボード Particleboard	12.7	17.31	-22.32	40~1,300
	15.2	16.66	-19.73	30~1,100
	20.2	17.75	-20.32	40~900
ハードボード Hardboard	3.9	14.39	-19.00	80~3,000
	4.9	16.29	-21.74	63~2,500
セミハードボード Semihardboard	11.9	16.49	-19.25	30~1,000
	14.8	16.10	-16.40	30~800
スプルース板 Spruce board	11.4	11.96	-14.69	80~2,500
石こうボード Plasterboard	8.7	21.77	-34.41	80~1,700
モルタル壁 Mortared wall	10	22.46	-27.46	63~630

* 注 Note TL : 透過損失 Transmission loss (dB),
 f : 周波数 Frequency (Hz).

同じく 10^4 で 3 dB 程度の値になる。セ
ミハードボードとハードボードとの差は
少ない。Fig. 12 は石こうボードなどの
 TL である。

fM の 2 つの範囲における各材料の
 TL の実験式を Table 4 に示す。また、
これから $f \cdot TL$ の実験式を導き、
Table 5 に示す。Table 4 を用いて、
 $fM=10^3, 10^4$ における $TL (=TL_{cal})$
を計算して、Fig. 13 に示し、各材料間
の比較をした。 $fM=10^3$ (f は低音とみ
てよい) では、厚い合板の (P6~P21)
の TL_{cal} が大きい値になるのに対して、
パーティクルボード、石こうボード、モ
ルタル壁 (セメント木ずり) が小さい値
となる。しかし、 $fM=10^4$ では、後
者の値が大きくなる。また上図に示した石
こうボード、モルタルの $dTL/d(fM)$
は他の材料より著しく大きい。

拡散音場に対する質量則 ((2)式) に
対して、音波の入射角が 0° (垂直)~ 78°
の場合の質量則も提案されている。これ
によると、

$$TL_m = TL_0 - 5 \quad (7)$$

で与えられる⁸⁾。Fig. 9~12 の破線は

(7) 式による計算値を図示した。図から明らかなように、 $fM=10^4$ では、 TL_m は \overline{TL} より約 4 dB 大
きくなって、 \overline{TL} よりずれていた実測値の説明が可能になる。しかし、 10^3 では TL_m と厚い材料の TL
との差が 3~5 dB あり、 TL_m でも十分説明できない。この原因として、板の振幅や内部摩擦によって音
波のエネルギーが消費されることが考えられる。

板の微小部分の質量を m とすると、この部分に音波の正弦波が作用すると、振幅 ε と作用する力 F は

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (8)$$

$$F = -\varepsilon_0 m \sin \omega t \quad (9)$$

となる。 ωt を θ に置きかえて、 F を $F_0 \sin \theta$ の簡単な形にする。完全な弾性体以外の材料では、力に対
して変形は位相角 δ だけ遅れるので、音圧が微小部分になす仕事 w は

$$w = F \cdot d\varepsilon = F_0 \cdot \sin \theta \cdot d [\varepsilon_0 \sin (\theta - \delta)] \quad (10)$$

と考えられる。これに動的弾性率 E を導入すると⁷⁾、(11) 式が得られる。

$$w = E\varepsilon_0^2 \sin \theta \cos \theta d \theta + E\varepsilon_0^2 \sin^2 \theta \tan \delta d \theta \quad (11)$$

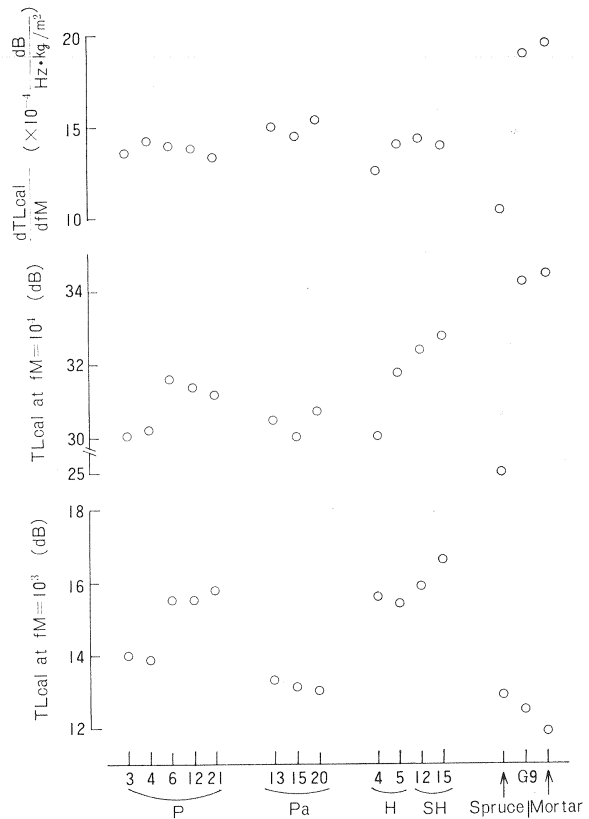


Fig. 13 ボードの計算による透過損失
(TL_{cal} , Table 4)
Comparison of calculated transmission
loss of boards (TL_{cal} , Table 4).

P, Pa, H, SH, G: see Table 1; fM : 周波
数×面密度 Frequency×Area density

Table 6. エネルギー損失量と透過
Relation between amount of energy loss and transmission

材 料 Materials	厚 さ Thickness (mm)	動的 ヤング率 Dynamic YOUNG'S modulus ($\times 10^{10}$ dyn/cm ²)	損失正接 Loss tangent	$fM=500$ (Hz·kg/m ²)			
				振 幅 Ampli- tude (μ)	周 波 数 Frequen- cy (Hz)	エネルギー 損失量 Energy loss ($\times 10^2$ erg/cm ² sec)	TL (dB)
合 板 Plywood	2.7	4.37	0.02~ <u>0.03</u> *	0.05	370	0.4	9
	5.6	4.85	〃	0.4	145	10.6	10
	12.0	5.34	〃	1.5	65	73.5	11
パーティクルボード Particleboard	12.7	2.78	0.02~ <u>0.04</u> *	0.5	57	4.9	8
	15.2	3.15	〃	〃	48	4.7	8
	20.2	3.44	〃	〃	38	4.1	8
ハードボード Hardboard	3.9	5.82	0.02~ <u>0.04</u> *	1.0	126	92.1	11
	4.9	7.02	〃	〃	95	83.8	11
セミハードボード Semihardboard	11.9	2.81	0.02~ <u>0.03</u> *	1.5	68	40.5	11
	14.8	2.62	〃	〃	56	31.1	11

* 注 Note 下線 Underlines: エネルギー損失の計算に使った値 The values used to obtain energy loss.

(11) 式の右辺第 2 項は、材料の内部摩擦による音のエネルギーの損失（その程度が $\tan \delta$ ）を意味しており、周波数 f における損失量 w' は、

$$w' = \pi E \epsilon_0^2 f \tan \delta \tag{12}$$

となる。この結果、音波の消耗するエネルギーは E 、 $\tan \delta$ のほかに ϵ_0^2 、 f に比例する。Table 6 に特定の fM における w' の計算値を示す。この際、 ϵ_0 は加速度から計算した振幅であり、 $\tan \delta$ は粘弾性スペクトロメーターを用いて測定した。Table 6 から、 w' には、 ϵ_0^2 と f の影響が大きいがわかる。いま、合板を例にして説明すると、 $fM=500$ の場合、Fig. 9 より合板が厚いほど、 TL は少しずつ大きい。Table 6 でも、厚い合板ほど w' が大きいので、音のエネルギーがボードによって吸収され、このため、 TL が大きくなったと考えられる。パーティクルボードでは、厚さがちがっても、 TL に差がなく、 w' もほぼ同じ値である。ハードボードの w' は大きく、 TL も大である。このように、 TL と w' の相互関係から、 fM に対する TL の変動を説明できる。

次に、 $(fM) > 10^4$ では、コインシデンス効果によって、 TL が小さくなるので、Table 4 の実験式は適用できない。

材料の密度を ρ (g/cm³)、厚さを t (mm) とすると、

$$M = 10\rho t \text{ (kg/m}^2\text{)} \tag{13}$$

であるから、これを (4) 式に代入すると、

$$f_c M = \frac{10C^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12\rho^3}{E}} \tag{14}$$

を得る。材料の種類や同じ材料で厚さが異なっても、 ρ 、 E が同じ場合、 $f_c M$ は同一である。Fig. 9~11 の各図ごとに、各材料の $f_c M$ を計算し、それを平均して図上に矢印で表わした。計算値は実測値の谷を

損失
loss

$fM=1,000$ (Hz·kg/m ²)			
振幅 Amplitude (μ)	周波数 Frequency (Hz)	エネルギー 損失量 Energy loss ($\times 10^2$ erg/cm ² sec)	TL (dB)
0.007	740	0.01	14
0.03	290	0.12	15
0.2	130	2.61	16
0.1	114	0.40	13
"	96	0.38	13
"	76	0.33	13
0.15	252	4.14	16
"	190	3.77	16
0.2	136	1.44	16
"	112	1.11	16

だいたいとらえているといえる。ここで、ハードボードとセミハードボードでは、 ρ , E が異なるが、 f_cM は近い値になっている。

モルタル壁では明瞭な低下が現われない。スプルー板にも明瞭な谷がなく、 TL に凹凸が見られる。 $E_{\parallel}=8 \times 10^{10}$ dyn/cm² を用いると、 $f_cM=5.8 \times 10^8$, E_{\parallel} と E_{\perp} の平均 4×10^{10} を用いると 8.2×10^8 である。これに TL を比較して、計算による予測は困難なことがわかる。むしろ、 fM の広い範囲で TL が低くなって、 f_cM の特異点是不明瞭である。異形の断面形状のあぜくら壁の TL を周波数に対して示したのが Fig. 14 である。これも f_c は明瞭でない。

この数例のように、 f_c の理論に合わないものもあるが、多くのボード類の TL の低下は 8~13 dB 程度であり、 f_cM を過ぎると TL は増大して (2), (6) 式の理論直線に接近する。(14) 式は木質材料でも広く適用できるので、 ρ と E をパラメータとして、 t に

対する f_c を計算して Fig. 15 に示した。 ρ が小で、 t , E が大であると f_c が高音より中音へ低下してくるので、遮音上不利である。なお、Table 4 の右らんは f_c を過ぎた、 TL の回復過程の実験式の係数である。

2. 壁パネルの透過損失

建築音響の分野では、外観が一体の壁でも、間柱とは別に、ボードが層状であるとき、その数によって 2重壁、3重壁と呼ぶ。中空層をもつ場合が多いので、2重壁といえば中空2重壁を指す。ここでは、ボードを密着させただけのものを積層ボードと呼び、中空2重壁と区別している。

(1) 積層ボード

Fig. 16 にパーティクルボード (Pa 13) を 2重、3重に積層したボードの TL を示し、比較した。ボードは接着されていないので、ボードの間に間隙が存在すると想像される。積層ボードの TL は、2, 3枚のボードが相互に独立であれば、1枚の TL の 2, 3倍の TL になるはずである。これを Fig. 16 の各周波数の TL について検討すると、1重壁に比べて、積層2重壁の TL は 5 dB 程度大きくなるにすぎない。

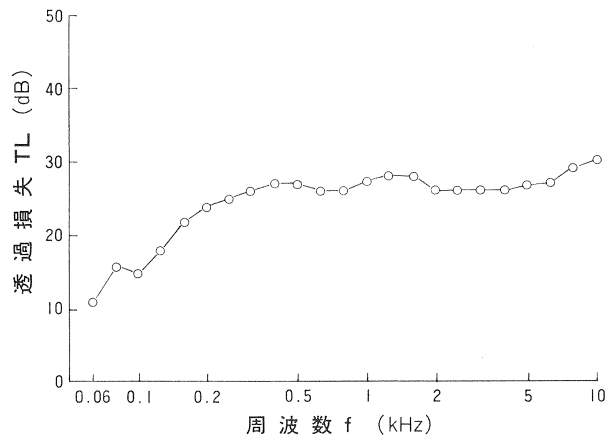


Fig. 14 あぜくら壁の周波数に対する透過損失
Transmission loss (TL) of the logs wall panel against frequency (f).

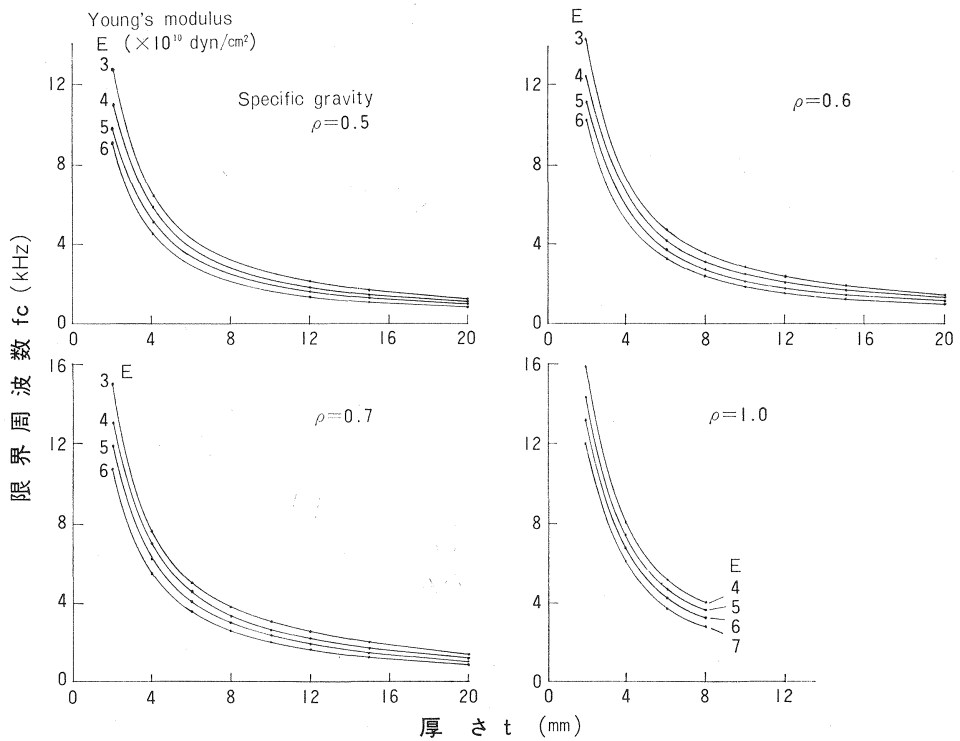


Fig. 15 木質材料の厚さと限界周波数の関係
Relation between thickness of wood-based materials (t) and critical frequency (f_c).

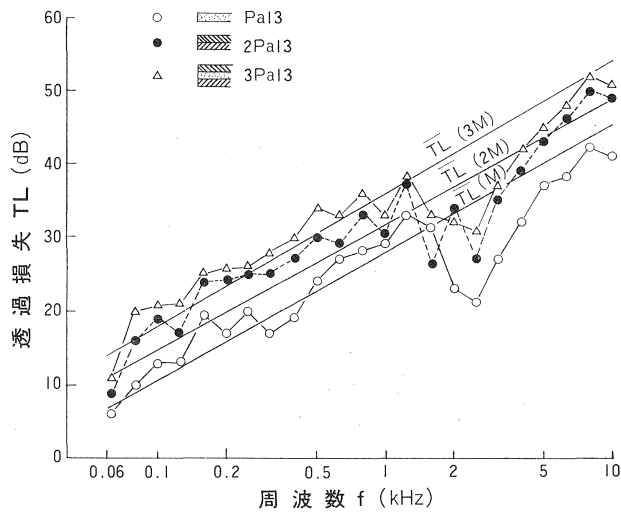


Fig. 16 積層パーティクルボードの透過損失
Transmission loss (TL) of laminated particleboards.
Pa 13, 2 Pa 13, 3 Pa 13 : see Table 1 ; M : 面密度 Area density

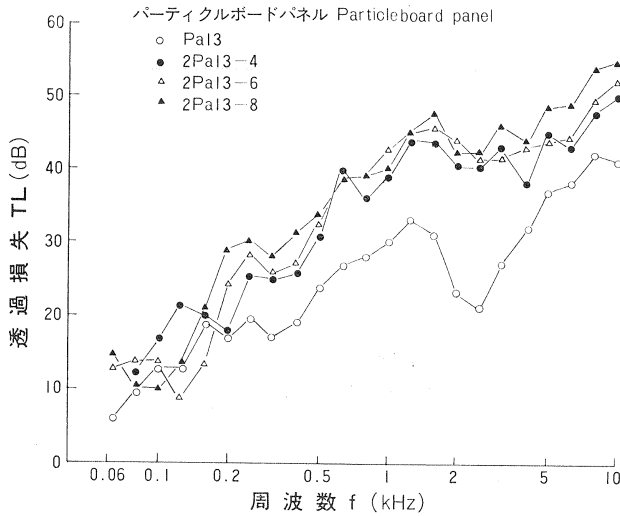


Fig. 17 中空層の厚さと透過損失
Relation between hollow-core thickness and transmission loss (TL).
Pa 13 : see Table 1 ; 2Pa13-4, 6, 8 : see Table 2.

各周波数の TL を平均すると、1重壁 24.6 dB、積層2重壁 29.5 dB である。他のボードの場合を Fig. 32 に示す。それでも 4~5 dB 大きいことがわかる。一方、積層した2重、3重壁を一体とみて、質量則 (6式) に $2M$ 、 $3M$ (M : 面密度) を代入してみる。この計算結果を Fig. 16 に図示した。計算値 $2M$ 、 $3M$ の直線は、実測よりずれるところもあるが、TL の大きさと周波数に対する傾向をだいたい表わしている。この結果、積層壁は、各ボードを独立とせず、一体とみて、質量則を適用できることがわかった。

(2) 2重壁と3重壁

Fig. 17 は、パーティクルボードを厚さの異なる枠 (4, 6, 8 cm) にくぎづけした、中空2重壁の TL である。1重壁に比較して、中空構造のパネルでは、200 Hz~1 kHz にかけて、TL の増加が著しいことがわかる。コインシデンス効果による低下も1重壁より軽度で、1.6 kHz より 6.3 kHz にかけて、5 dB 程度の浅い谷になっている。しかし、200 Hz 以下では、2重壁の TL は1重壁並に低下しているのが認められる。また、中空層の厚さが、4, 6, 8 cm の場合の TL の平均値は、32.2, 33.6, 35.4 dB のごとく、僅少差であるが少しずつ大きくなる。付表には、材料ごとに、一定周波数、中空層の厚さに対する TL を示す。2重壁の TL の平均値は 27~34 dB の範囲にあり、材料別では、合板が小さく、石こうボードが大きい。

Fig. 18~25 は、壁パネルとして標準的な、中空層が 8 cm の場合の TL の周波数特性を示す。500 Hz, 1,000 Hz における各厚さの中空層の TL を表面材料ごとに平均して、Table 7 に示した。合板に比べて、パーティクルボード、ハードボード、石こうボードの TL は大きい。また、0.5~1 kHz (1 oct.) における TL の増加は、表面材料の厚さが薄いとき著しい。2 kHz を過ぎて現われるコインシデンス効果は、その谷が浅く、TL の低下も軽度である。ただし、Fig. 18 の P6, Fig. 23 の G9 では鋭い谷になっている。一方、Fig. 19 のように、TL の低下がほとんどないものもある。

Fig. 26 は合板 (P6) の2重壁と3重壁の TL を比較したもので、木枠は 4 cm である。同様に Fig. 27~31 も、1重壁 (ボード)、2重壁、3重壁の比較である。なお、3重壁でガラス繊維を充てんした場合は、TL が 2~3 dB の増加にとどまるので、図から省略した。付表を参照されたい。

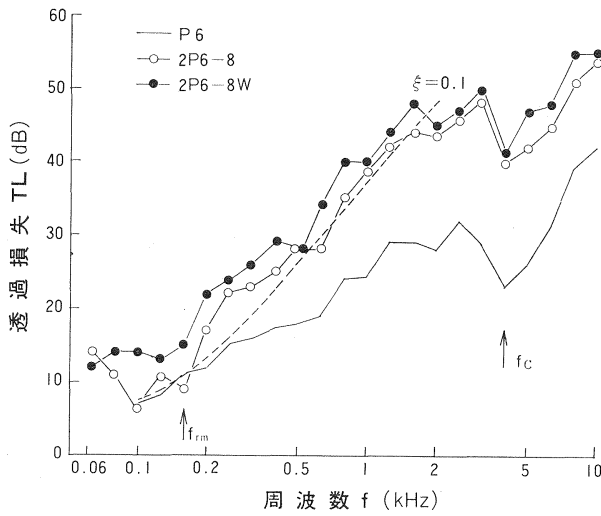


Fig. 18 合板パネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of plywood panel against frequency (f).

P 6 : see Table 1 ; 2P 6-8, 8W : see Table 2 ; f_c : 限界周波数 Critical frequency ; f_{rm} : 共鳴周波数 Resonant frequency ; ξ : (25) 式 (図の破線) のパラメータ Parameter of Eq. 25 (dashed line)

Fig. 19 合板パネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of plywood panel.

P 12 : see Table 1 ; 2P 12-8, 8W : see Table 2 ; f_c , f_{rm} , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

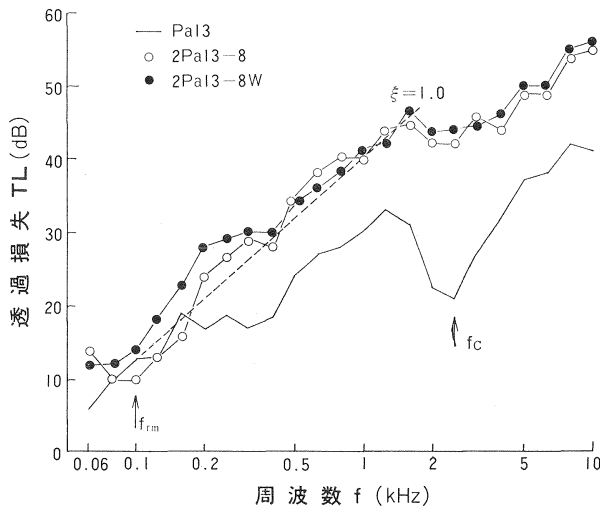
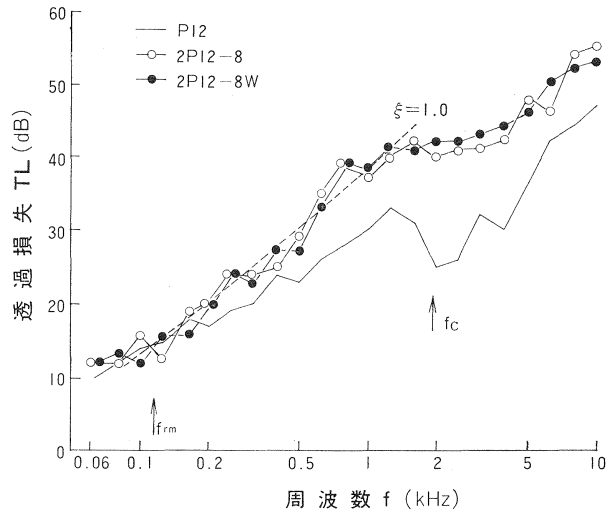


Fig. 20 パーティクルボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of particle-board panel.

Pa 13 : see Table 1 ; 2 Pa 13-8, 8W : see Table 2 ; f_c , f_{rm} , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

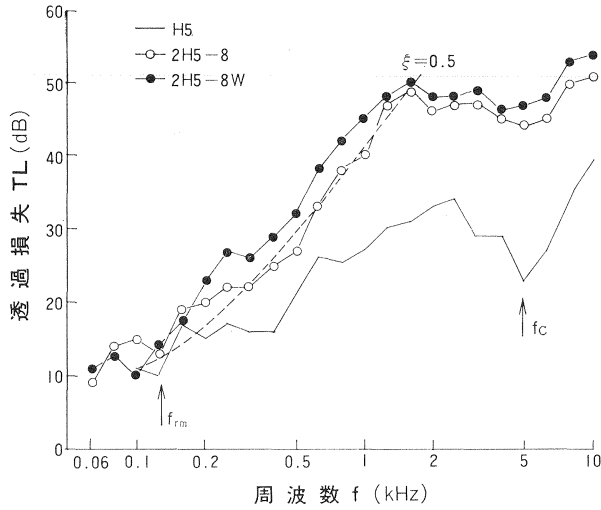


Fig. 21 ハードボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of hardboard panel.

H5 : see Table 1, 2H5-8, 8W : see Table 2 ; f_c , f_{rm} , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

Fig. 22 セミハードボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失
Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of semi-hardboard panel.

SH 12 : see Table 1 ; 2SH 12-8, 8W : see Table 2 ; f_c , f_{rm} , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

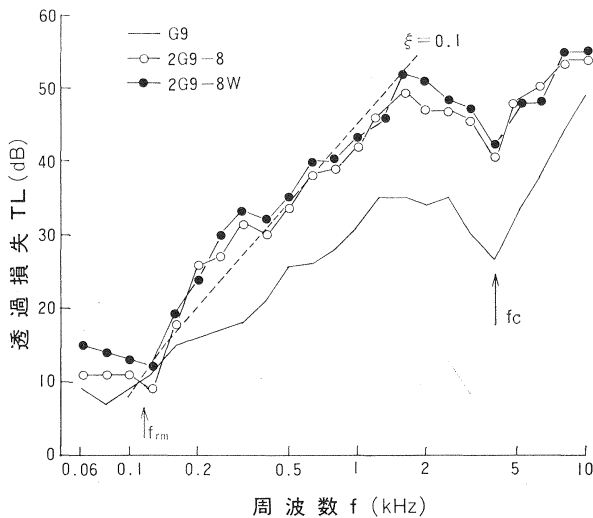
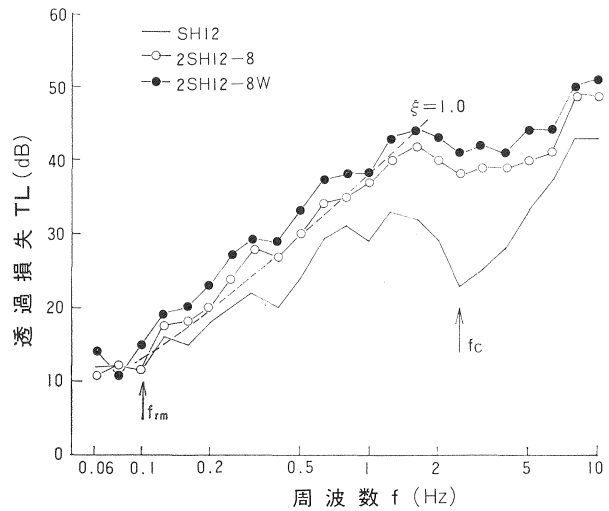


Fig. 23 石こうボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of plasterboard panel.

G9 : see Table 1 ; 2G9-8, 8W : see Table 2 ; f_c , f_{rm} , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

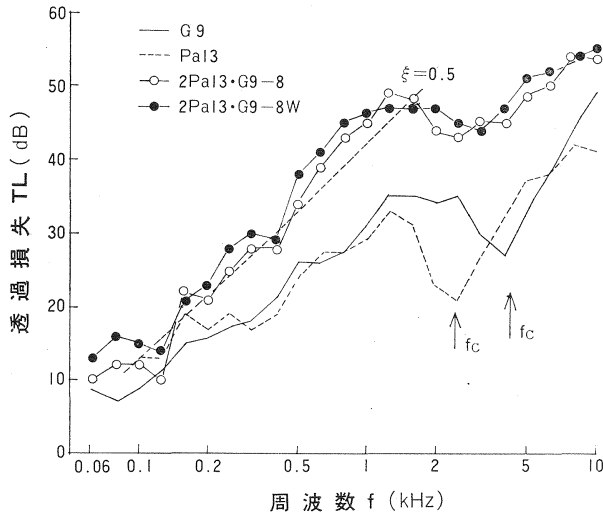


Fig. 24 パーティクルボード・石こうボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of particle-board and plasterboard panel.

G9, Pa13 : see Table 13 ; 2Pa13·G9-8, 8W : see Table 2 ; f_c , ξ : Table 18 参照, same as Table 18.

Fig. 25 合板・石こうボードパネルの1重壁と2重壁の透過損失
Transmission loss (TL) of single wall and twofold wall of plywood and plasterboard panel against frequency (f).

G9, P12 : see Table 1 ; 2P12·G9-8, 8W : see Table 2 ; f_c , ξ : Fig. 18 参照, same as Fig. 18.

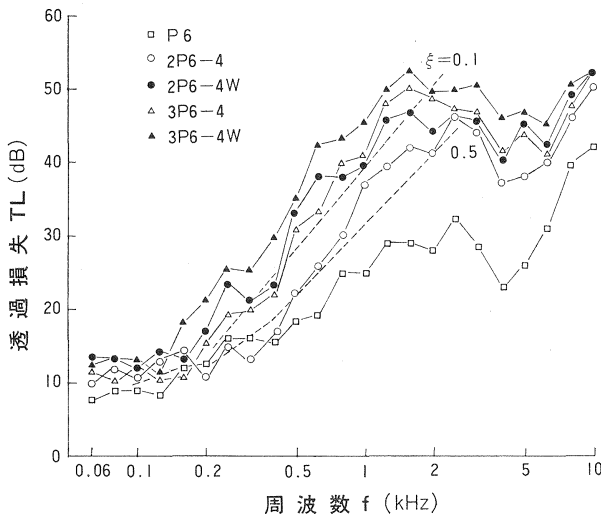
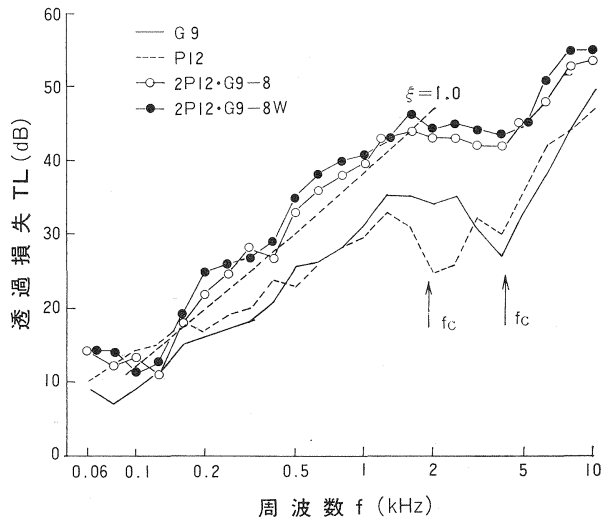


Fig. 26 合板パネルの1, 2, 3重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of plywood panel against frequency (f).

P6 : see Table 1 ; 2P6-4, 4W, 3P6-4, 4W : see Table 2 ; ξ : (25) 式 (図の破線) のパラメータ Parameter of Eq. 25 (dashed line)

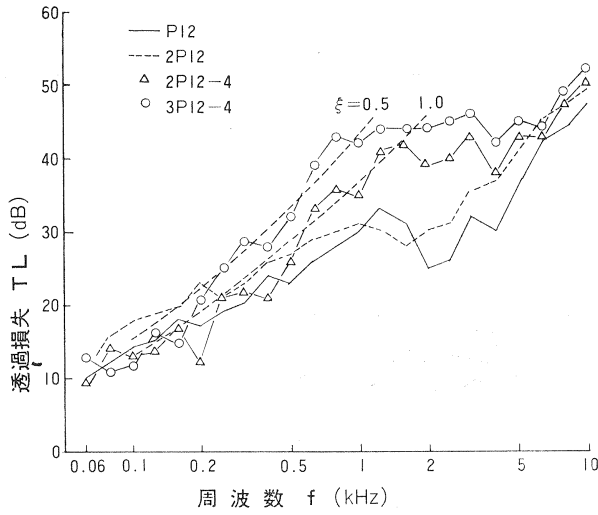


Fig. 27 合板パネルの1, 2, 3重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of plywood panel against frequency (f).

P 12, 2 P 12 : see Table 1 ; 2 P 12-4, 3 P 12-4 : see Table 2 ; ξ : Fig. 26 参照, same as Fig. 26.

Fig. 28 パーティクルボードパネルの1, 2, 3重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of particleboard panel against frequency (f).

Pa 13, 2 Pa 13 : see Table 1 ; 2 Pa 13-4, 3 Pa 13-4 : see Table 2 ; ξ : Fig. 26 参照, same as Fig. 26.

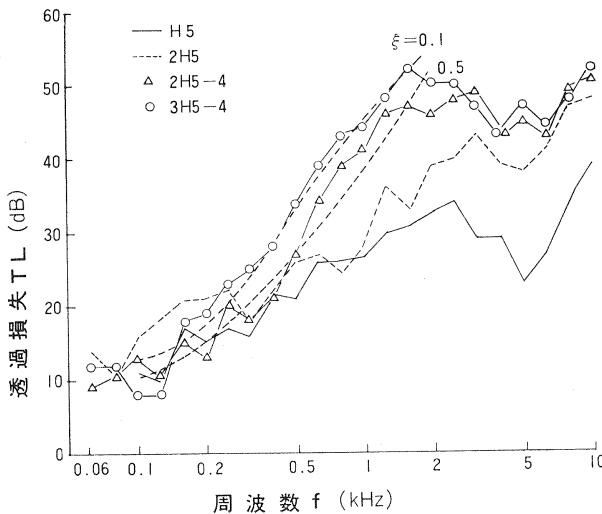
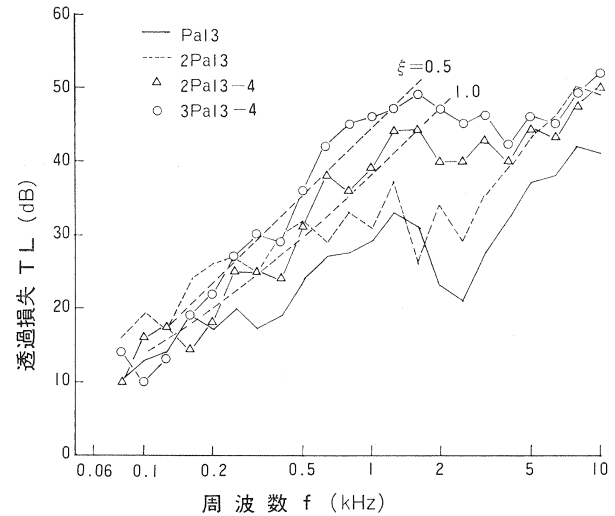


Fig. 29 ハードボードパネルの1, 2, 3重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of hardboard panel against frequency (f).

H 5, 2 H 5 : see Table 1 ; 2 H 5-4, 3 H 5-4 : see Table 2 ; ξ : Fig. 26 参照, same as Fig. 26.

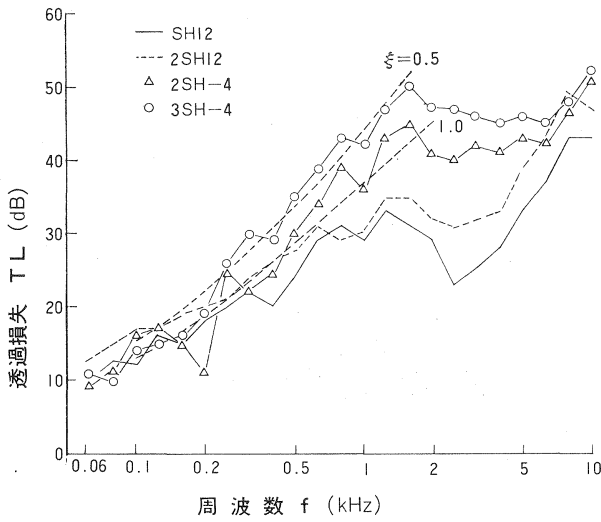


Fig. 30 セミハードボードパネルの 1, 2, 3 重壁の透過損失
Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of semihardboard panel against frequency (f).
SH 12, 2 SH 12: see Table 1; 2 SH 4, 3 SH 4: see Table 2; ξ : Fig. 26 参照, same as Fig. 26.

Fig. 31 石こうボードパネルの 1, 2, 3 重壁の透過損失

Transmission loss (TL) of single, twofold and threefold wall of plasterboard panel against frequency (f).

G 9, 2 G 9: see Table 1; 2 G 9-4, 3 G 9-4: see Table 2; ξ : Fig. 26 参照, same as Fig. 26.

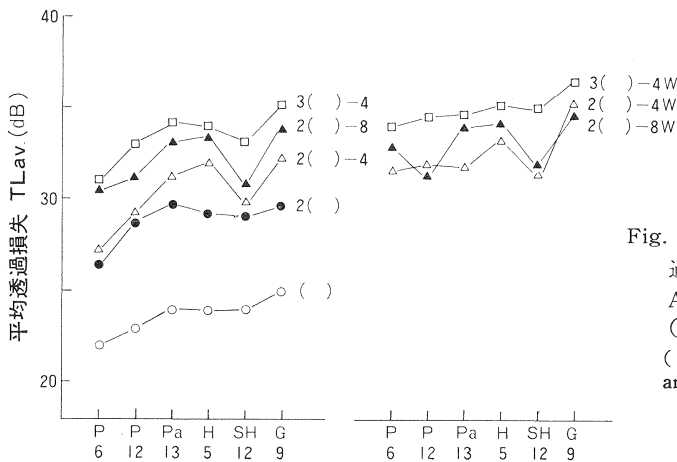
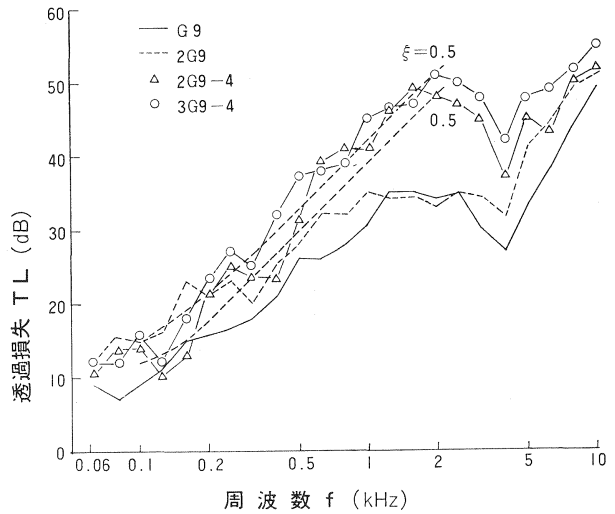


Fig. 32 ボードべつ壁パネルの平均透過損失
Average transmission loss (TL_{av}) of wall panels.
(): ボード名と厚さ Sample board and its thickness.

Table 7. 透過損失の増加
Increment of transmission loss

表板 Face board		中空層 Hollow core	2重壁 Twofold wall			3重壁 Threefold wall ΔTL 1 oct.
			av. TL at 500Hz	av. TL at 1kHz	$\frac{\Delta TL}{1 \text{ oct.}}$	
合板 Plywood	(P6)	—*1	25	38	13	10
	"	GW*2	30	40	10	10
	(P12)	—	28	37	9	10
	"	GW	31	39	8	7
パーティクルボード Particleboard	(Pa13)	—	32	40	8	10
	"	GW	35	41	6	7
ハードボード Hardboard	(H5)	—	27	40	13	10
	"	GW	32	44	12	3
セミハードボード Semihardboard	(SH12)	—	31	38	7	7
	"	GW	34	39	5	3
石こうボード Plasterboard	(G9)	—	33	40	7	8
	"	GW	36	42	6	6

*1 中空層にガラス繊維を充てんしない。Hollow core is not filled with glass wool.

*2 中空層にガラス繊維を充てんする。Hollow core is filled with glass wool.

3重壁の TL は2重壁より 3~4 dB 程度大きくなるのが各周波数で認められる。2重壁と同様の現象として、周波数が 200 Hz 以下と 6.3 kHz 以下では、1重壁や積層2重壁の TL とほぼ同じ程度の大きさになる。しかし、 TL の中音域での増加勾配が大きいこと、1 kHz よりコインシデンス効果が生じる付近にかけて、 TL の低下が少なく、1重壁との差は極めて大きい。かつ、この領域では2重壁との差も画然としている。これらは3重壁のすぐれた性能といえる。

Fig. 32 は材料別の各壁パネルの平均した TL である。() はボードを意味しており、2()-4 は中空層が 4 cm の2重壁のことである。右図は中空層にガラス繊維を充てんした場合である。() より、2()-4 または 2() にいたる TL の増大は顕著であるが、2()-8 より 3()-4 への増大は少ない。これは 30 dB 以上になると、 TL を増加させるのが次第にむずかしくなることを意味する。枠材に固定された 2, 3重壁は振動が伝わりやすく、層数を増しても、 TL の増加率が少ないといわれている。

(3) ガラス繊維の充てん効果

II, 1 で記述した実験条件で、ガラス繊維を充てんした。これによって、 TL は増加するが、付表に詳しいので、ここでは2重壁について簡単に説明する。

空気層が 4~8 cm の場合について、構成材料べつに、充てんによる TL の増加を、全周波数について平均すると下記のごとくである。

P6 : 3.4 dB, P12 : 1.8 dB, Pa13 : 0.9 dB, H5 : 1.7 dB, SH12 : 1.1 dB, G9 : 1.3 dB

このように、ガラス繊維のような吸音材料の充てんによって、1~3 dB の遮音性の向上が可能である。

Fig. 18~25 では、各周波数についての充てん効果を示したものであるが、周波数に対する特性は見られない。また、3重壁でも、1~3 dB の増加になっており、Fig. 32 では、2重壁と比較して示されている。

る。

(4) 2重壁と3重壁の透過損失の理論

中空層をもつ2重壁の透過損失の理論については、圧力差と粒子速度の連続の式から、

$$TL_2 = 10 \log_{10} \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2\rho' C} \right)^2 \left\{ \cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho' C} \right) \sin kd \right\}^2 \right] \quad (15)$$

が導かれている⁸⁾。ここに、 $k = \omega/C$ 、 d : 中空層の厚さである。(15)式を用いて、Fig. 17の2Pa 13-8の500 HzのTLを計算すると、 $TL_2 = 63$ dBになり、実測の34 dBの約2倍になっている。周波数によっては、(15)式は実測値に適合しにくい。しかし、(15)式より誘導できる、2重壁の共振周波数 f_{rm} は、

$$f_{rm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho' C^2}{md}} \quad (16)$$

となる⁸⁾。この周波数で、2重壁は共振するため、音の透過がよくなるといわれている。いま、供試した2重壁について f_{rm} を計算すると、表面材料によって異なるが、 $f_{rm} = 100 \sim 150$ Hzの範囲になり、2重壁の実測したTLの低下位置とよく一致する。Fig. 18~23に、 f_{rm} を矢印で示した。各図から明らかのように f_{rm} 付近でTLは1重壁(ボード)並に低下して、前述のごとく、遮音性能が著しく低下しているのがわかる。(15)式はこの意味で、重要であり、この式の $f = f_{rm}$ では、 $TL_2 \rightarrow 0$ になる。

ここでは、2重壁の遮音を、(15)式によらず、質量則を満しながら、減衰のある機械的振動系へ適用させた。

2重壁の質量則は、1重壁と同様に、

$$\begin{aligned} TL_0 &= 20 \log_{10} 2Mf - 42.5 \\ TL_1 &= TL_0 - 10 \log_{10} (0.23(TL_0)) \end{aligned} \quad (17)$$

が成立するとする。これはmass効果だけであるから、減衰の機能をもたせるため、Fig. 33(A)の、質量、バネ、ダンシュポットの作用をもつ振動系を用いる。質量 m に振動力 $F = F_0 \sin \omega t$ が作用したときの強制振動の運動方程式は、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Ex = F_0 \sin \omega t \quad (18)$$

となり、 x : 変位、 c : 粘性抵抗係数、 E : 弾力係数である。この解は⁹⁾、 $c = 2\alpha m$ 、 $\omega_0^2 = E/m$ とおくと、

$$x = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}} \sin(\omega t - \delta) = a \sin(\omega t - \delta) \quad (19)$$

である。さて、Fig. 33(B)の複素平面上に、力 F_0 と振幅 a をとると、 \dot{x} は、

$$\dot{x} = a\omega \cos(\omega t - \delta) \quad (20)$$

となって、振幅より $\pi/2$ 位相の進んだベクトル ωa で示される。ベース bb' に働く力は弾力 Ea と粘性力 $c\omega a$ の合力になるから、

$$P = \sqrt{(Ea)^2 + (c\omega a)^2} \quad (21)$$

となる。これは2重壁から背面の空気に伝達される音圧に相当する。透過損失は透過率で表現できるから、力の伝達率を r とすると、

$$r = \frac{P}{F_0} = \frac{E \cdot a}{F_0} \sqrt{1 + \frac{c^2\omega^2}{E^2}} \quad (22)$$

が得られる。 $F_0 = Es$ とおくと、 s は F_0 に対する静的変位である。これを用いて r を書き直すと、

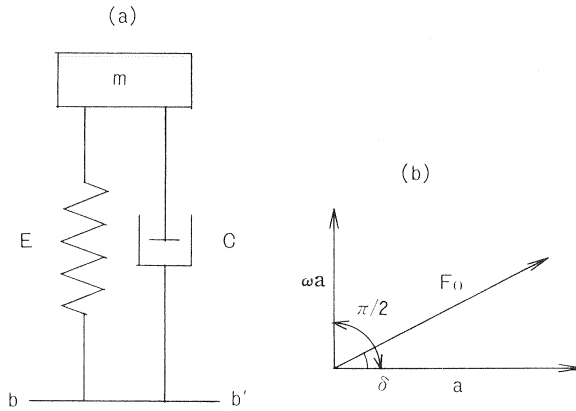


Fig.33 振動系 Vibrational system.

$$r = \frac{a}{s} \sqrt{1 + \frac{c^2 \omega^2}{E^2}} \quad (23)$$

となる。(19) 式より a/s を求めると、

$$\frac{a}{s} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^4}}} \quad (24)$$

(24) 式を (23) 式に代入すると、

$$r = \frac{\sqrt{1 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (25)$$

すでに明らかなように、 $\omega_0^2 = E/m$ 、 $2\alpha = c/m$ 、 $\xi = \alpha/\omega_0$ 、 $\omega_0 = 2\pi f_{rm}$ 、 $\omega = 2\pi f$ である。したがって、力の伝達から求めた透過損失は、

$$TL_{II} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (26)$$

となり、先の質量則に加えると、

$$TL_{III} = TL_I + TL_{II} = \overline{TL} + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (27)$$

となる。

(27) 式を用いて、ガラス繊維を充てんしていない場合の2重壁について計算して、Fig. 18~25 上に破線で示した。ただし、減衰項の ξ をパラメータとして0.1~1.0の範囲で動かして、実測値と適合のよい曲線にした。 ξ の値は各図に示した。この条件下では、理論式は実験値と比較的によく一致している。

3重壁については(17)式に $3Mf$ を代入し、(27)式を用いて2重壁と同じように計算した。計算結果を Fig. 26~31 に図示した。この場合も実験値と比較的によく一致している。ただし、2重壁も3重壁の場合も理論式の適用範囲はコインシデンスの現われる周波数以下である。

ξ は材料の粘性的性質に加えて、構造体の形状因子が関与する複雑な常数で、ここでは、パラメータとして扱った。 ξ をかえてみると、理論曲線の形が多少であるが変化してくる。

一方、100 Hz より小さいところの TL は、(27) 式より大きく、換言すれば、(27) 式は100 Hz 以下では使うことができず、2重壁の100~1,000 Hz における遮音特性を示すのに適当である。

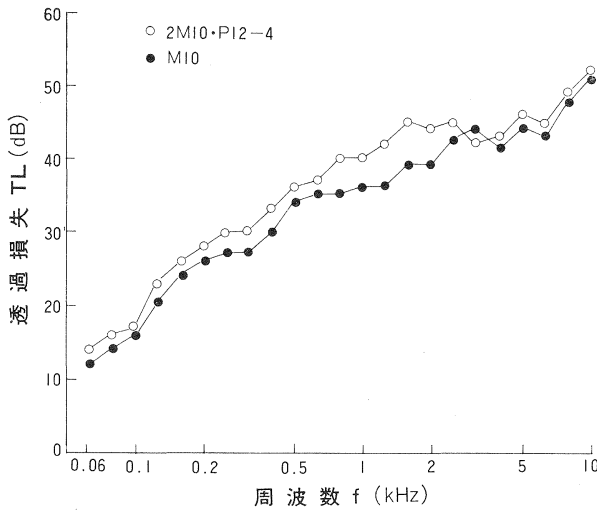


Fig. 34 モルタル壁 (M10) と外装モルタル壁 (2M10・P12-4) の透過損失

Transmission loss (TL) of mortared wall (M10) and exterior mortar-finished wall (2M10・P12-4) against frequency (f).

Fig. 34 に、モルタル壁、これに内装を複合した壁の TL の周波数変化を示す。周波数に対して、TL は比較的なだらかで、とくに低音域では、TL の低下が少ない。f_{rm} が顕著でないから、既述の 2 重壁よりすぐれた性質を持っている。モルタル、石こうボードなどと木質材料の複合構造の遮音は今後期待できるものである。

3. 聴取り試験による不明瞭度

透過損失を実際の話声の透過の程度と結びつけるため、小学生の討論テープを壁を通して流し、II, 3, (3) の方法で、スピーチの明瞭度を判定した。明瞭度は、内容の了解度と音節の明確さの 2 点に注意して、スピーチ全体の中で、明瞭に聞きとれる部分をパーセントで表わした。

で表わした。

Fig. 35, 36 では、横軸にスピーチの音量を平均の音レベルで示し、縦軸に判定した明瞭度を表わした。被験者 2 人の判定を結んだ曲線が明瞭度曲線である。明瞭度曲線の左側の部分は、不明瞭度の積分で、この面積は感覚的透過損失と考えてもよい。これを不明瞭度 Q として、次の定義を与える。

$$Q = \frac{\text{明瞭度曲線の左側の面積}}{\text{図の全面積}[(90-55)\text{ホン} \times 100\%]} \times 100 (\%)$$

上式の Q と平均の TL を比べると、Fig. 35 の合板の上下図では、TL=30, 33 dB→Q=53, 62%, Fig. 36 のパーティクルボードの上下図では、TL=33, 34 dB→Q=63, 69%, Fig. 37 のモルタルの上下図では、TL=31, 34 dB→Q=50, 68%となり、TL と Q の大小関係がほぼ対応している。1 重、2 重、3 重壁について Q と中音域の平均透過損失を対応させたのが Fig. 38 である。また、Table 8 は材料の種類によって整理した。この表によると、Q や TL の小さい 1 重壁、パーティクルボード、モルタル壁、石こうボードのように両者が大きいものなど、材料、壁の構造による差が比較的明瞭になった。

Fig. 39 は、外部から壁を通して侵入してくる一定レベルの騒音によって、室内のスピーチがマスクされるとき、スピーチの音量を調節して、スピーチの内容(天気予報)を判別できる最小音量を縦軸に、壁の種類を TL で示して横軸に表わした。2 重壁に比較して、ガラス繊維を充てんした各種構成の 3 重壁(4W)の平均した最小音量は小さい値になる。しかし、2 重壁は構成が変わっても明確な差がない。スプルー板 (TL_{av} 22 dB) が 56.5 ホン、あぜくら壁 (TL_{av} 24 dB) が 55 ホンであり、2 重壁と近い値になる。聴覚試験であるため、微妙な差異の判別がつけにくいように思われる。しかし、TL_{av} の増加に対する最小可聴音量の減少傾向は破線のように示されるので、TL と外部騒音とを結びつけられる可能性が得られた。今後、測定精度の向上のための検討が必要である。

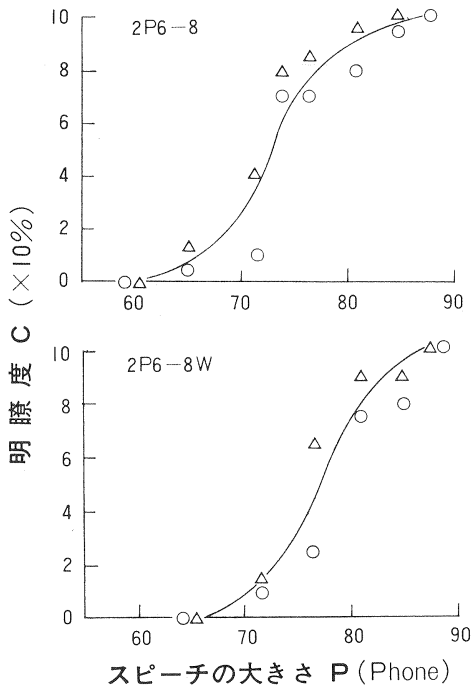


Fig. 35 スピーチの大きさと明瞭度
Relation between sound level of speech (P)
and intelligibility outside of wall (C).
2P6-8, 8W : see Table 2

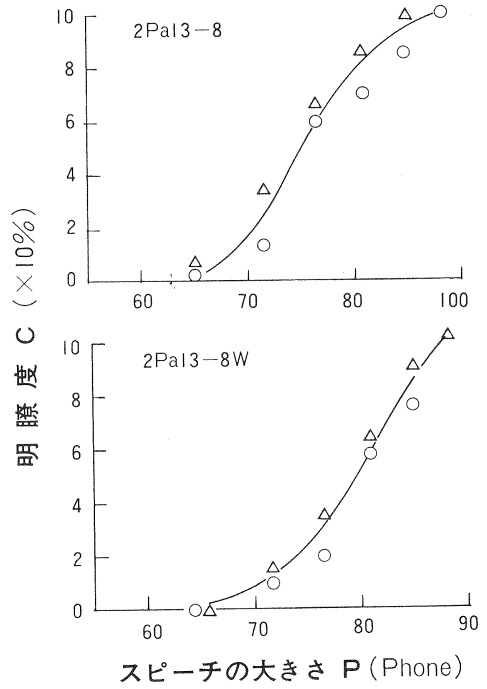


Fig. 36 スピーチの大きさと明瞭度
Relation between sound level of speech (P)
and intelligibility outside of wall (C).
2Pa13-8, 8W : see Table 2.

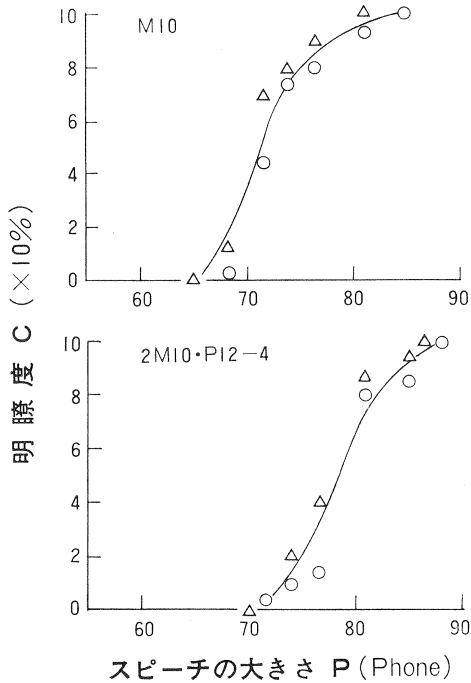


Fig. 37 スピーチの大きさと明瞭度
Relation between sound level of speech (P)
and intelligibility outside of wall (C).
M10, 2M10-P12-4 : see Table 1 and 2.

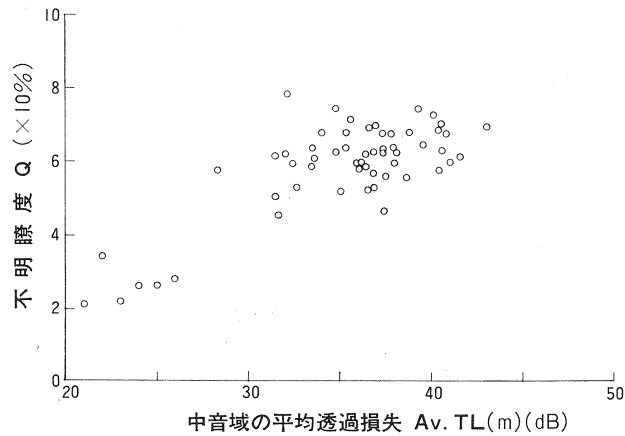


Fig. 38 壁パネルの中音域の平均透過損失とスピーチの不明瞭度
Relation between average transmission loss in the middle frequency range (av. $TL(m)$) and unintelligibility of speech (Q).

av. $TL(m)$ の周波数範囲 Frequency range of av. $TL(m)$: 135~1,600 Hz.

Table 8. スピーチの不明瞭度
Unintelligibility of speech outside of wall

パ ネ ル Panels	不明瞭度 Unintelligibility Q (%)	平均透過損失 TL_{av} (40 Hz~1 kHz)
2 重壁 Twofold wall		
2 P 6-4, 6, 8, 4W, 6W, 8W	0.46~ <u>0.55</u> ~0.62	30.2
2 P 12 "	0.59~ <u>0.63</u> ~0.69	31.0
2 Pa13 "	0.61~ <u>0.665</u> ~0.71	32.4
2 H 5 "	0.60~ <u>0.63</u> ~0.67	32.7
2 SH12 "	0.55~ <u>0.60</u> ~0.66	31.6
2 G 9 "	0.57~ <u>0.62</u> ~0.66	33.6
2 Pa13・G 9 "	0.56~ <u>0.64</u> ~0.69	34.2
3 重壁 Threefold wall		
3 P 6-4, 4W	0.60	32.4
3 P 12 "	0.68	33.8
3 Pa13 "	0.70	34.4
3 H 5 "	0.66	34.4
3 SH12 "	0.63	34.1
スプルース板 Spruce board	0.14	22
合板 Plywood (12 mm)	0.22	23
パーティクルボード Particleboard (13 mm)	0.26	24
ハードボード Hardboard (5 mm)	0.21	24
あぜくら壁 Logs wall panel	0.22~ <u>0.26</u> ~0.35	24
モルタル壁 Mortared wall	0.50	32
外装モルタル壁 Exterior mortar-finished wall	0.68	35.5

注 Note 下線 Underlines : 平均値 Average values.

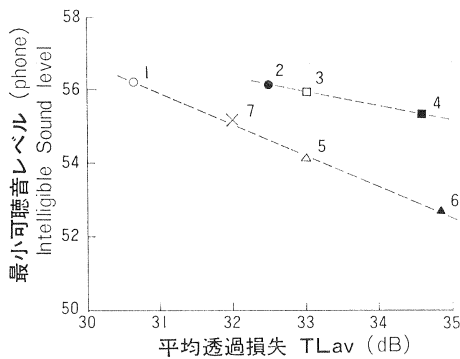


Fig. 39 壁パネルの平均透過損失とスピーチの最小可聴音レベル

Relation between average transmission level (TL_{av}) of wall panel and intelligible sound level of speech.

1: 中空2重壁 Hollow-core twofold wall; 2: 同 GW 充てん Same wall with glass wool; 3: 石膏ボード中空2重壁 Hollow-core twofold wall of plasterboard; 4: 同 GW 充てん Same wall with glass wool; 5: 中空3重壁 Hollow-core threefold wall; 6: 同 GW 充てん Same wall with glass wool; 7: モルタル壁 Mortared wall, TL_{av} の周波数範囲 Frequency range of TL_{av} : 40Hz~10kHz.

IV 摘 要

中空型の木質系壁体は種類が多いため、系統的な遮音のデータがこれまで見あたらない。この研究では、基本的な木質系壁パネルの透過損失を測定し、データの空白を埋めた。得た結果を分析して、壁体、材料間の性能の比較、木質材料と構造の遮音特性、透過損失の実験値と理論値の比較、遮音性能向上の問題点などを検討した。その要約は次のようである。

(1) 遮音測定装置の試作

音源、受音室を多層の吸音層よりなる内壁と遮音性の高い外壁からなる構造にした。両室は、内部の反射音の減衰、外部の騒音の遮断は良好で、ブランク法の実験が可能になった。すなわち、両室の中間に試験体を取りつけ、これに白色雑音を投射して、透過音の音圧レベルを測定した。試験体は、木質ボード類、これによる壁体、モルタル壁、間伐材利用のあぜくら壁である。

(2) ボードの遮音性

ボードの透過損失は周波数と面密度の影響を受ける。透過損失は、低音で、軽量なものほど小さく、高音で、重いものほど大きい。一般に、合板に比べて、ハードボード、パーティクルボードの遮音性がよい。これは、ボードの種類によって、振動によるエネルギーの損失に相違があり、遮音に影響すると考えた。高音域でも、特定の周波数で、遮音性が極度に低下する現象（コインシデンス効果）があり、この周波数位置を計算して、予測の可能性を示した。ここでは、ボードの屈曲振動がはげしく、音をよく伝達する。

(3) 木質中空壁パネルの遮音

枠材に表板をはった中空2重壁、3重壁では、中音域から高音域にかけて、35 dB以上のすぐれた遮音性能を示す。しかし、低音とくに100 Hz付近では、相対する表板が共鳴して音の伝達がよくなり、1重壁並に音を通過させる。この欠点は、中空層に吸音材料を充てんしたり、表板の一方を他の材料にかえると、少し改良できる。2, 3重壁のように層数がふえると、界面で音波の減衰がある。壁を粘性項のある機械的振動系に類似できると考え、力の伝達率を求めた。これで質量則を補正して、透過損失を計算すると、中音域の実測値をかなりよく説明できる。

(4) モルタル壁

従来工法のモルタル壁では、周波数に対する欠点の少ない、比較的遮音性の高い性能を示す。実際に、モ

ルタルや内装の厚さを増加させると、戸境壁として十分な性能をもつ。

(5) 平均透過損失

以上の木質系壁パネルの 40~10,000 Hz における平均透過損失は、1 重壁（薄いボードを除く）で 20~25 dB、積層壁 25~30 dB、中空 2 重壁 27~34 dB、中空 3 重壁 31~35 dB である。2 重壁、3 重壁でも、構成材料が石こうボード、ハードボード、パーティクルボードの壁は遮音性がよい。中空層の厚さが増加するほど、少しずつ遮音がよくなり、中空層にガラス繊維を充てんすると、透過損失が約 2 dB 増加する。壁の要求性能として、間仕切壁では 25~30 dB、戸境壁では 35~40 dB とされている。

木質壁パネルは間仕切には問題ないが、モルタル、石こうボードなどと組合せると、戸境壁として使える十分な性能が期待できる。

(6) 実用面での活用

各種の木質壁パネルの遮音のデータが得られ、理論からの裏づけがなされたので、設計に利用できる。遮音には重量壁しかないという一般論に対して、木質材料でも一定のレベルの遮音性のある壁を作ることが可能である。しかし、低音における欠点の改良は現在かなり困難を伴う。また、遮音壁、断熱壁、耐力壁は構造上で相反するところがあり、若干の整理が必要である。居住者に対しては、壁の透過損失と会話の透過、明瞭度との関係が求められ、透過損失をより具体的な量として説明できた。

文 献

- 1) 佐藤孝二・子安 勝・坂上文壽・楯 林次・中村俊一：小林理研報告，10，No. 1，58，(1960)
- 2) 高橋 徹・田中千秋・池上優一・瀬沼 勲・岩重博文：島根大農研究報告，No. 7，69，(1973)
- 3) 子安 勝：木質材料の遮音，小林理学研究所，41，(1971)
- 4) 佐藤孝二・子安 勝・剣持富紀夫：小林理研報告，11，No. 1，1，(1961)
- 5) 日本音響材料協会編：建築音響工学ハンドブック，技報堂，364，(1963)
- 6) 子安 勝・中村俊一：日本音響学会誌，16，No. 4，265，(1960)
- 7) 後藤廉平・平井西夫・花井哲也：レオロジーとその応用，共立，108，(1063)
- 8) 前川純一：建築音響，共立，103，(1976)
- 9) 松平 精：基礎振動学，共立，52，(1957)

Appendix-Table 1. ボードの透過損失
Transmission loss of boards

材 料 Materials	厚 さ Thick- ness (mm)	面密度 Area density (kg/m ²)	周 波 数 Frequency (Hz)						
			125	250	500	1,000	2,000	4,000	40 Hz~ 1 kHz av.
合 板 Plywood	2.7	1.35	7	8	10	15	22	26	14
	4.0	2.02	7	7	13	18	26	26	16
	5.6	3.44	8	15	18	24	28	23	20
	12.0	7.62	15	19	23	30	25	30	23
	21.0	12.74	20	22	26	26	32	34	25
パーティクルボード Particleboard	12.7	8.85	13	20	24	30	23	22	24
	15.2	10.49	15	19	27	29	23	32	24
	20.2	13.33	17	20	29	29	30	33	26
ハードボード Hardboard	3.9	3.94	9	17	18	24	28	23	21
	4.9	5.25	10	17	21	27	33	29	24
セミハードボード Semihardboard	11.9	7.38	16	20	24	29	29	28	24
	14.8	8.98	17	21	27	31	26	31	26
スプルース板 Spruce board あせくら壁 Logs wall panel 石こうボード Plasterboard モルタル壁 Mortared wall メラミン樹脂板 Melamine resin board ストラミット Stramit (Compressed straw) mat	11.4	4.95	9	12	20	21	26	28	19
	(80)	26.46	18	25	27	27	26	26	24
	(30)	26.46	18	25	27	27	26	26	24
	8.7	7.03	11	17	26	31	34	27	25
	10	17.86	20	27	34	36	39	41	32
	1.5	2.09	7	10	13	21	27	29	19
50	26.08	37	37	44	40	41	43	40	

Appendix-Table 2. 壁パネルの透過損失
Transmission loss of wall panels

壁 パ ネ ル Wall panel	周 波 数 Frequency (Hz)						
	125	250	500	1,000	2,000	4,000	40 Hz~ 10 kHz av.
合板パネル Plywood panel							
2 P 6—4	13	15	22	37	41	37	27.2
” 6	13	19	25	37	41	34	27.8
” 8	11	22	28	39	44	40	30.4
” 4 W	14	23	31	39	44	40	31.5
” 6 W	14	24	30	40	41	38	31.5
” 8 W	13	24	28	40	45	40	32.8
3 P 6—4	10	20	31	41	48	41	30.8
” 4 W	11	26	35	45	50	45	34.0
2 P 12—4	14	21	26	35	39	38	29.2

Appendix-Table 2. つづき (Continued)

壁 パネル Wall panel	周 波 数 Frequency (Hz)						
	125	250	500	1,000	2,000	4,000	40 Hz~ 10 kHz av.
2 P12—6	13	21	28	39	38	41	29.8
" 8	15	24	29	37	40	42	31.2
" 4 W	18	25	32	37	41	38	31.8
" 6 W	17	26	33	42	39	44	32.4
" 8 W	16	24	27	37	42	44	31.3
3 P12—4	16	25	32	42	44	42	33.0
" 4 W	20	28	35	42	43	43	34.6
パーティクルボードパネル Particleboard panel							
2 Pa13—4	18	25	31	39	40	38	31.3
" 6	9	27	32	42	44	42	31.4
" 8	13	27	34	40	42	44	33.2
" 4 W	21	28	35	41	45	38	31.8
" 6 W	15	27	35	40	44	45	32.8
" 8 W	18	29	34	41	43	46	34.0
3 Pa13—4	13	27	36	46	47	42	34.1
" 4 W	21	27	40	47	48	43	34.6
ハードボードパネル Hardboard panel							
2 H 5—4	11	20	27	41	46	43	32.0
" 6	13	21	28	38	42	43	30.4
" 8	13	22	27	40	46	45	33.4
" 4 W	12	26	32	45	46	44	33.2
" 6 W	15	27	33	41	44	44	33.4
" 8 W	14	27	32	45	48	46	34.2
3 H 5—4	8	23	34	44	50	43	33.6
" 4 W	15	28	41	44	50	42	35.2
セミハードボードパネル Semihardboard panel							
2 S H12—4	17	25	30	36	41	41	29.8
" 6	19	28	32	41	42	40	32.5
" 8	18	24	30	37	40	39	30.7
" 4 W	18	25	33	37	42	38	31.4
" 6 W	19	30	37	41	44	42	33.3
" 8 W	19	27	33	38	43	41	31.7
3 S H12—4	15	26	35	42	47	45	33.3
" 4 W	14	30	40	43	50	42	34.9
石膏ボードパネル Plasterboard panel							
2 G 9—4	10	25	31	41	48	37	32.2
" 6	15	25	33	38	46	35	32.7
" 8	9	27	34	42	47	41	34.0
" 4 W	14	32	38	44	50	40	35.1

Appendix-Table 2. つづき (Continued)

壁 パ ネ ル Wall panel	周 波 数 Frequency (Hz)						
	125	250	500	1,000	2,000	4,000	40 Hz~ 10 kHz av.
2 G 9—6 W	16	27	34	40	43	36	32.7
” 8 W	12	30	35	43	51	42	34.9
3 G 9—4	12	27	37	45	51	42	35.2
” 4 W	18	36	42	48	52	46	36.7
パーティクルボード・ 石膏ボードパネル Particleboard and plasterboard panel							
2 Pa13・G 9—4	13	23	30	41	44	40	32.8
” 6	12	25	33	37	42	42	32.4
” 8	10	25	34	45	44	45	34.0
” 4 W	14	29	35	43	45	40	34.0
” 6 W	15	27	37	42	46	47	36.0
” 8 W	14	28	38	46	47	47	36.2
合板・石膏ボードパネル Plywood and plasterboard panel							
2 P12・G 9—4	12	23	29	39	42	39	31.2
” 6	10	25	30	37	42	42	31.0
” 8	11	25	33	40	43	42	31.3
” 4 W	12	22	31	42	43	40	32.6
” 6 W	12	25	34	40	44	44	34.3
” 8 W	14	26	35	41	44	43	34.2

**Studies on Wood-based Components for Prefabrication
of Wooden House Report III
Sound transmission loss of wood-based panels**

Masaharu SUZUKI⁽¹⁾, Hisayoshi SAITO⁽²⁾ and Toshinari TANAKA⁽³⁾

Summary

The transmission loss of wood-based panels is studied for the purpose of improving the noise abatement capacity of wooden walls used for house construction.

The authors designed convenient equipment for measuring transmission loss with good accuracy. As shown in Fig. 2, the sound generating chamber is mounted on the opening of the sound receiving chamber with high absorbing capacity of sound. A loud speaker is set in the center of the sound generating chamber and a condenser microphone in the receiving chamber. The block diagram of equipment is shown in Fig. 3. White noise is used as source. Sound level through 1/3-octave band filter is automatically recorded.

Test samples are the single wall (boards of wood-based materials), the twofold wall and the threefold wall. Procedure of measurement is as follows; sound pressure level L_1 is measured without the specimen (blank test) and L_2 with the specimen. Transmission loss (TL) is calculated as the difference of both ($TL=L_1-L_2$).

Results are summarized as follows: The transmission loss of the single wall increases with frequency except at the frequency where the coincidence phenomenon occurs (Fig. 7). A rough approximation of TL against frequency (f) is given by the empirical formula; $TL=a' \log f+b'$, where a' and b' of specimens are listed in Table 3. Most single walls of wood-based materials show a little higher values of transmission loss than those calculated from the equation of random incidence mass law. Transmission loss is plotted against the abscissa of fM (frequency \times area density) in Figs. 9~12 where solid lines are given by the equation of the law. The measured values are larger than the calculated ones by 2 or 3 dB in the range of $4 \times 10^2 < fM < 10^4$.

When fM is from 1×10^4 to 3×10^4 , transmission loss decreases remarkably on account of the coincidence effect. Figs. 18~23 show a good agreement between the critical frequency f_c *1 and the minimum of the transmission loss. The acceleration of vibrational movement of board is noticeably increased at the critical frequency as shown in Fig. 8.

The averages of the transmission loss for 63 Hz to 10 kHz range 20~25 dB for single walls, 27~34 dB for the twofold walls and 31~35 dB for the threefold walls.

The twofold walls and the threefold walls exhibit higher transmission loss than the single walls in the middle frequency range. The increments of TL per octave are 7~13 dB for the twofold walls and 5~7 dB for the single walls.

The transmission loss of the twofold walls is influenced by the thickness of wall and

$$*1 \quad f_c = \frac{C^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho}{E}}$$

C : sound velocity, h : thickness, ρ : density, E : YOUNG's modulus.

Received June 27, 1979

(1) (2) Wood Technology Division (3) Wood Utilization Division

material for face board. Those of plasterboard, hardboard and particleboard are clearly larger than the others. The twofold wall resonates in the low frequency range and transmits the noise considerably. When hollow core is filled with glass wool, transmission loss is increased by 2~3 dB.

The transmission loss of the twofold wall is predicted by the following formula;

$$TL = \overline{TL} + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{r} \right)$$

$$r = \frac{\{1 + 4\xi^2(\omega/\omega_0)\}^{1/2}}{[\{1 - (\omega/\omega_0)\}^2 + 4\xi^2(\omega/\omega_0)]^{1/2}}$$

where \overline{TL} : the random incidence mass law, r : transmissive rate, $\omega = 2\pi f$, $\omega_0 = 2\pi f_{rm}$ (f_{rm} *2: the resonant frequency of twofold wall) and ξ : the parameter in relation to viscous effect of vibrational body. There is a comparatively good agreement between the calculated TL (the dashed line in each figure) and the measured TL in the frequency from 100 to 2,000 Hz.

In order to get the relation between transmission loss and sensation to noise. Test of clearness and intelligibility of speech outside of wall is conducted. Unintelligibility of speech is roughly related to the transmission loss of all the walls examined (Table 8 and Fig. 38).

*2 $f_{rm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho' C^2}{Md}}$

ρ' : density of air, M : area density, d : thickness of hollow core.