

## 建築用木材の部材化に関する研究 第4報

## 木質壁パネルの熱貫流率

斎藤 寿 義<sup>(1)</sup>

Hisayoshi Saito : Studies on Wood-based Components  
for Prefabrication of Wooden House Report IV  
Thermal transmittance of wood-based wall panels

**要 旨** : 多様化している木質系壁用ボードおよびそれらによる壁パネルの熱貫流特性を把握し、木質系家屋の断熱設計の基礎資料として役立つため、実用寸法に準ずる大きさ (90×60 cm) の試験用パネルを用いて熱貫流率の測定、考察を行った。実験装置は、ASTM 規格に準じて小型化した保護加熱箱方式のもので、低温側空気温度を 5~15°C の範囲で制御し、風速を 3.0 m/sec とした。高温側空気温度は成り行きとし、風速は 1.2~1.5 m/sec である。ボード類の表面熱伝達抵抗は表裏両面の和で 0.12~0.17 m<sup>2</sup>h°C/Kcal の範囲内におさまり、合成樹脂で成形加工された滑面を有するボードがおおむね大きい値を示した。密閉型中空パネルの中空層における等価熱伝導係数は、表面が極端に粗い本毛セメント板を用いたパネルで、他のパネルよりやや大きい値を示し、わずかではあるが層内空気対流の影響による変化があるものと思われた。放射伝熱の影響については、アルミ箔を用いたパネルが極端に小さい値を示したほかは、顕著な相違はなかった。中空層に木製棧木を入れたパネルでは、空気と棧木の並列合成熱伝導抵抗値と実験値は比較的良好一致し、棧木に C 型軽量型鋼を用いた場合は、計算による予測が無理であった。中空層の一部に断熱材を充填したパネルでは、空気層の等価熱伝導係数が断熱材の位置によってかなり変化することがみとめられた。薄い合板の 3・4 重壁、薄い板の上に角材を等間隔で接着接合したパネル等の実験的パネルの熱貫流率、およびパネルの継目等に生ずる隙間の影響についても検討した。

## 目 次

I はじめに	58
II 実験方法	58
1. ボード類の熱伝導率測定法	58
2. 熱貫流率測定法	59
(1) 測定装置	59
(2) 測定方法	60
III 試験体	61
IV 測定結果および考察	62
1. ボード類の各含水率における熱伝導率	62
2. ボード類の熱貫流率	63
3. 壁パネルの熱貫流率	66
(1) ボードの種類と中空層熱伝達	66
i) 対流効果	67
ii) 放射伝達の影響	69
(2) 種々のボードと合板の中空壁	70

4. 中空層における栈木の影響	71
5. 中空層における軽量型鋼製の栈の影響	73
6. 中空層における断熱材の影響	73
V 二、三の試作パネルの熱貫流率	75
1. 薄い合板の 3, 4 重壁	75
2. 薄い板の上に断面が矩形および三角形の角材を一定間隔で並べたパネル	76
3. 壁パネルの継目等に生ずる隙間の影響	77
VI あとがき	78
引用文献	78
Summary	79

## I はじめに

家屋における壁体の断熱性能は、屋内気候の安定、保温に関連するので古くから取り上げられている問題であり、最近では冷暖房効率、省エネルギー等の観点から見直されており、部材の居住性能評価でも重要な項目の一つとされている。

壁体の断熱性能を定量的に示す熱貫流率を実験的に求めようとすると、ASTM の試験法にも規定されているように試験体が実用に供し得る規模である必要があり、必然的に測定装置が大型化し、実験がかなり大がかりになる。このため、一般に熱貫流率を求める際には、実測によらず、壁体を構成する各要素の熱伝導抵抗、壁体表面における熱伝達抵抗などを用いて計算によって求めることが多い。

しかし、使用される材料の種類や壁構造の複雑さなどによって、計算値と実測値の間にかかなりの差が生ずる場合が少なくない。そこで、本報では、実用最小限度の寸法に対応すると考えられる大きさ 90×60 cm、厚さ 10 cm までの供試体が測定できる装置を ASTM 規格に準じて製作し、これによって各種の木質系パネルおよび壁用ボード類の熱貫流率を測定して、計算値との対応で熱貫流特性を検討した。

なお、本報のとりまとめに際し、前物理研究室長 鈴木正治氏をはじめ、ご助力をいただいた関係諸氏に深甚の謝意を表します。

## II 実験方法

### 1. ボード類の熱伝導率測定法

試験用パネルに用いたボード類の熱伝導率は保護加熱板方式<sup>1)</sup>による定常法によって測定した。この試験片は、大きさが 30×30 cm で各種ボード (90×180 cm) から試験用パネルに用いる試料を取った残部より、それぞれ 2 枚ずつ採取した。

ボード類の中、一部、含水率との関係を求めるために用いた実験装置は、溶剤の沸点および蒸発熱を利用する方式のものである<sup>2)</sup>。

この測定装置に用いた試験片は、一辺が 6 cm の正方形試片の 4 隅を欠いた正 8 角形のもので、前述のように残部より、それぞれ 5 個ずつとり、あらかじめ水に浸漬して含水率を高めたのち、60°C の恒温器中に置いた飽湿容器中に入れておき、適時秤量を行って高含水率状態の試料に調整した。低含水率状態は試料を室内に放置しておき、室内の雰囲気ではほぼ平衡したものを供試した。

## 2. 熱貫流率測定法

### (1) 測定装置

装置は ASTM 規格<sup>9)</sup>に定める保護加熱箱方式に準拠し、小型化して試作したものであり、その測定部の概要を Fig. 1 に示す。測定部は加熱箱と冷却箱からなり、その間に試験体を取り付け、三者を一体として回転できるようにしてある。加熱箱はいわゆる保護加熱箱方式であり、内箱（測定箱）と外箱（保護箱）の2重構造になっている。内箱周壁には示差熱電対が取り付けられてあり、内外両箱間の温度差を検出して温度調節計を作動させ、外箱ヒーターを制御して内外両箱内温度を常に等しく保ち、内箱内で発生する熱はすべて試験体を貫流して冷却箱に移動する。

箱の周壁の断熱性については、冷却側は熱量測定に関与しないのであまり問題はないが、加熱側は測定、保護両箱とも周壁の断熱性能が測定精度に影響をおよぼすため、ASTM では測定箱の周壁の熱伝導係数を  $0.2 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$  ( $\approx 0.98 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )、保護箱では  $0.1 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$ 、JIS A 1414-1973 では両箱とも  $0.4 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  以下であるように規定している。本装置では、保護箱周壁は厚さ  $5 \text{ cm}$  のポリスチロール板を用いて外周を覆うことで規定値を得たが、測定箱の場合、小型装置で測定面積をできるだけ大きくしようとすると、この値を得ることはかなり困難であり、周壁の熱伝導係数は  $1.1 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  となり、性能的にやや不満足なものとなった。

装置内の空気は、外付きモーターによる小形ファンを用い、冷却箱内で最高  $5 \text{ m/sec}$ 、測定箱内では最

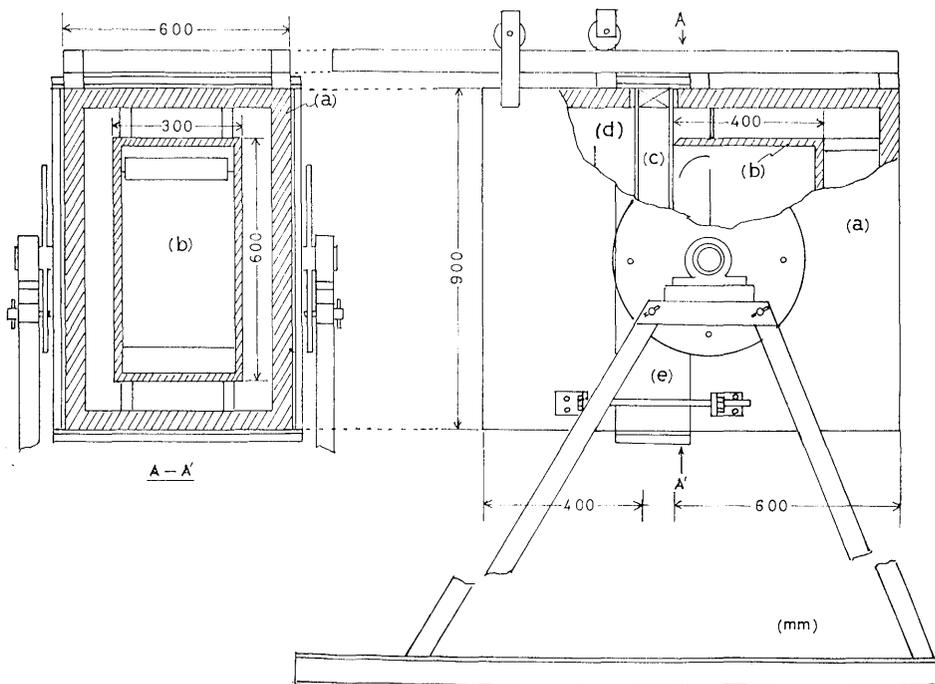


Fig. 1 熱貫流率測定装置

Equipment for measuring thermal transmittance.

- |           |             |         |              |
|-----------|-------------|---------|--------------|
| (a) 保護箱   | Guard box   | (b) 測定箱 | Metering box |
| (c) 試験パネル | Test panel  | (d) 冷却箱 | Cooling box  |
| (e) 保護板   | Guard plank |         |              |

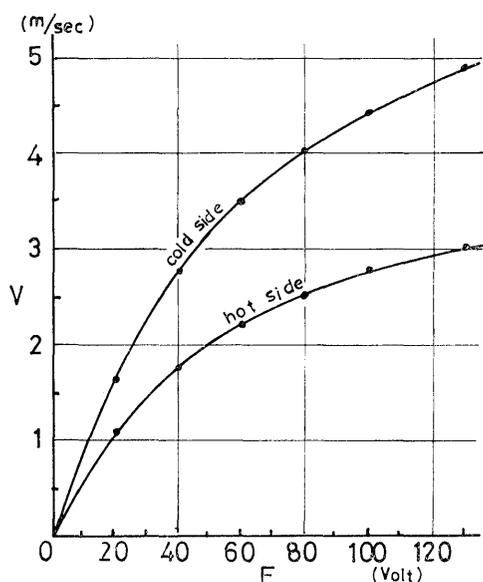


Fig. 2 ファン用モーターの制御電圧 ( $E$ ) と箱内の風速 ( $V$ )

Relation between control voltage ( $E$ ) for fan motor and wind velocity ( $V$ ) in metering box and cooling box.

測定位置：パネル中央面より 1.0 cm  
Measuring point: At the center of panel and 1.0 cm aside from the surface.

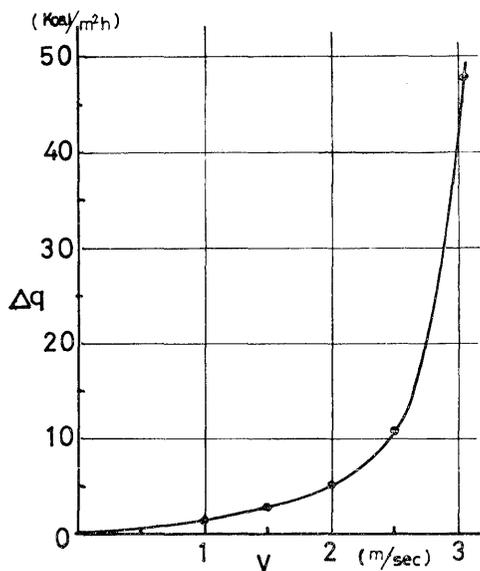


Fig. 3 測定箱内の風速 ( $V$ ) とファンによる発熱量 ( $\Delta q$ )

Relation between wind velocity ( $V$ ) in metering box and amount of heat ( $\Delta q$ ) by revolution of fan.

高 3 m/sec までの風速で試験壁面に沿って自然対流の方向に巡回するようにした。両箱内の風速はファン用サーボモーターの制御電圧を変えて加減したが、そのために、試験壁面として硝子面を用い、その中央で面から 0.5~1.5 cm 離れた位置の平均風速を白金線風速計で測定し、モーターの制御電圧との関係を求めた。Fig. 2 はその関係を示したものである。ファンを用いた場合、測定箱内ではファンによる発熱を考慮する必要がある。このためには、予め保護加熱板方式によって、その一部の熱伝導係数を求めた 12 mm 合板を用いて、風速と合板両面間の温度差との関係からファンの発熱量を実験的に求め、Fig. 3 に示したような関係を得た。したがって、装置内の風速は Fig. 2 の関係から制御電圧で定め、発生熱量のファンによる増加分は Fig. 3 の関係から求めた。

(2) 測定方法

測定系統のブロックダイアグラムを Fig. 4 に示す。測定は定常法により、冷却箱内の空気温度と加熱側測定箱での発熱量を一定に保ち、試験体各部および測定箱内の空気温度が定常になるまで記録する方法で行った。その際、測定箱への投入電力、測定箱と保護箱内空気の温度差の発生の有無も記録計を用いて測定経過中の確認を行った。測定の終了時点で各測点の温度を 0.1  $\mu$ V 精度のデジタル  $\mu$ V 計を用いて熱電対の起電力として求め、10 度分割折線起電力-温度曲線から 0.1  $^{\circ}$ C の精度で求めた。測定用熱電対の配置は Fig. 5 に示すように、高低温両側で試験体表面に 3 対、空気中に 3 対ずつを基本とし、実験によって適宜必要な位置に配置した。熱電対は直径 0.25 mm の C-C で、試験体の表面ではその接点部を長さ約 10 mm 板面に熱可塑性接着剤を用いて圧着した。

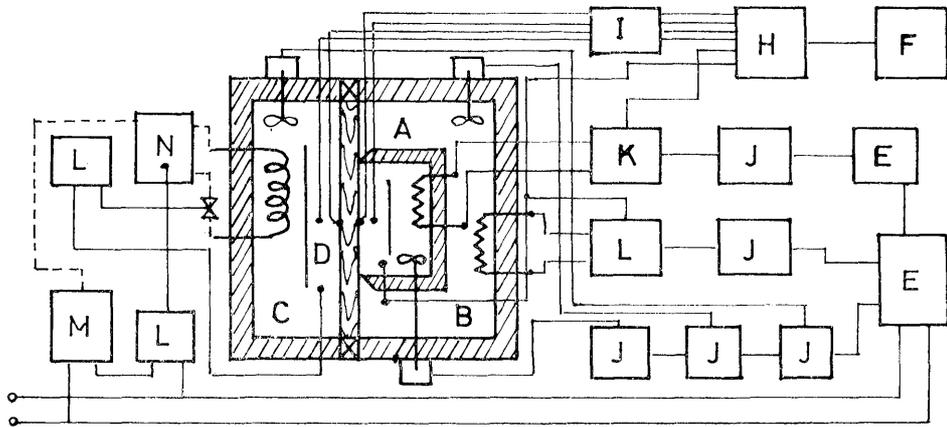


Fig. 4 測定装置のブロックダイアグラム

Block-diagram of equipment.

- |          |              |           |                        |          |                 |
|----------|--------------|-----------|------------------------|----------|-----------------|
| A: 測定箱   | Metering box | B: 保護箱    | Guard box              | C: 冷却箱   | Cooling box     |
| D: 試験パネル | Test panel   | E: 定電圧装置  | Stabilizer             | F: 電圧計   | $\mu$ V meter   |
| H: 記録計   | Recorder     | I: 冷接点補償器 | Ice jar                | J: 電圧調整器 | Slide regulator |
| K: 電力計   | Watt meter   | L: 温度制御器  | Temperature controller |          |                 |
| M: 冷凍機   | Refrigerator | N: 冷媒     | Cold liquid            |          |                 |

### III 試験体

熱貫流率測定用の試験体は、いずれも大きさが  $60 \times 90$  cm のものである。

ボード類は、すべて市販の規格サイズ ( $91 \times 182$  cm) のものより採取した。木質板については、試験時にその含水率を電気式水分計で測定したが、いずれも  $6 \sim 8$  % の範囲であった。種類、記号等は Table 1 に示すとおりである。

中空壁に使用した木枠はエゾマツ材で、枠材の幅は 3 cm とした。厚さは試験の種類によって異なるが、主として 6 cm で、1.0, 1.75, 2.0, 3.0, 4.5, 8.0 cm のものも使用した。枠の大きさはボードと同寸の  $60 \times 90$  cm である。

試作パネルとして特殊な構成のものについて実験を行ったが、その試験体については、それぞれの項目で使用した材料、構成等について述べることにする。

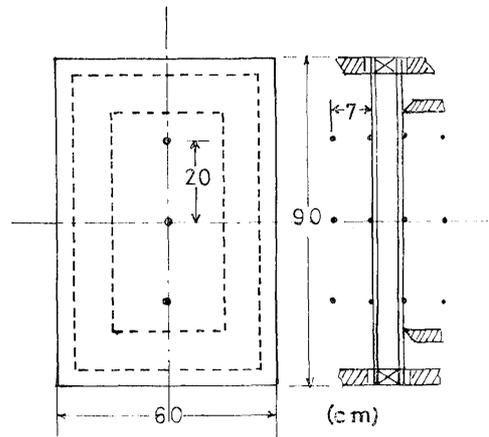


Fig. 5 試験パネルと測温位置  
Test panel and measuring points of temperature.

Table 1. 供試ボード  
Test boards

試料 Boards	記号 Mark	厚さ Thickness (mm)	比重 Specific gravity	熱伝導率*1 Thermal conductivity (Kcal/mh°C)	含水率*2 Moisture content (%)
合板 Plywood	P-3	3.0	0.50	0.086	7.0
合板 Plywood	P-5	5.2	0.58	0.089	7.0
合板 Plywood	P-12	12.1	0.56	0.102	7.0
クロスはり合板 Cloth overlaid plywood	Pc-3	3.7	0.56	0.083	8.0
パーティクルボード Particleboard	Pa-12	12.0	0.73	0.115	7.0
繊維板 Hardboard	H-6	6.0	1.11	0.130	6.0
硬質インシュレーションボード Rigid insulation board	I-15	14.5	0.28	0.043	10.5
木毛セメント板+合板 Wood wool cement board+ plywood	W-17	14.0+3.0	(0.46)	(0.075)	—
穴あき吸音板*3 Acoustic board with hole	Ac-6	0.55	1.2	0.156	—
スタイロボード+合板 Foamed polystyrol+plywood	Ps-15	13.0+2.6	(0.13)	(0.039)	—
石膏ボード Plasterboard	Pl-12	12.1	0.78	0.167	—
珪酸カルシウム板 Silicate calcium	Si-6	5.8	0.75	0.120	—
スレート板 Slate	St-4	3.9	1.71	0.289	—
硝子板 Glass	G-3	3.0	2.46	0.603	—

\*1 保護加熱板方式による実験値 Experimental value by Guarded Hot Plate Method.

\*2 電気式水分計による By electric moisture meter.

\*3 半貫通 Half perforation.

( ) 複合したものの値 Value of a complex.

#### IV 測定結果および考察

##### 1. ボード類の各含水率における熱伝導率

木材の熱伝導率については、従来からよく知られており<sup>4)5)</sup>、木質ボード類についての報告もあるが<sup>6)7)</sup>、繊維飽和点付近の比較的含水率の高い場合の測定例は少ない。

壁体に用いられる木質系ボード類は、含水率が変化することによって、熱伝導率も変化して断熱性能に影響をおよぼし、とくに高含水率域では、性能低下が考えられる。

ここでは、壁体の熱貫流特性の検討資料として、主な木質ボード、(P-5)、(H-6)、(Pa-12)、(I-15) について、含水率の全乾状態から50~60%の範囲で、含水率  $u$  の変化に伴う熱伝導率  $\lambda$  の変化を求めた。

Fig. 6 は、その測定結果である。従来、木材の繊維に直角方向の熱伝導率  $\lambda_{\perp}$  と含水率  $u$  との関係は、ほぼ比例的<sup>4)5)</sup>、あるいは  $u$  の増加と共に指数的に  $\lambda_{\perp}$  は増加し、密度によって、 $\lambda_{\perp}$  の値および増加傾向が異なることが確かめられている。ここで行った4種のボードでの測定結果でも図に示したように、ほぼ同様の傾向がみられ、いずれのボードも  $u \div 30\%$  で  $\lambda_{\perp}$  は全乾時のほぼ1.5倍、 $u \div 50\%$  で2倍程度の値となった。

2. ボード類の熱貫流率

ボードを単体で隔壁とした場合、ボードを境にした両空間の温度差を  $\Delta\theta$  とすれば、定常下で、単位時間、単位面積あたりの通過熱量  $q$  は、

$$q = K \cdot \Delta\theta \quad \dots\dots\dots(1)$$

であり、ここで  $K$  が熱貫流率である。

$1/K$  を熱貫流抵抗  $R_K$  とし、ボードの熱伝導係数を  $C$ 、両表面の熱伝達率を  $\alpha_F, \alpha_B$  とすれば

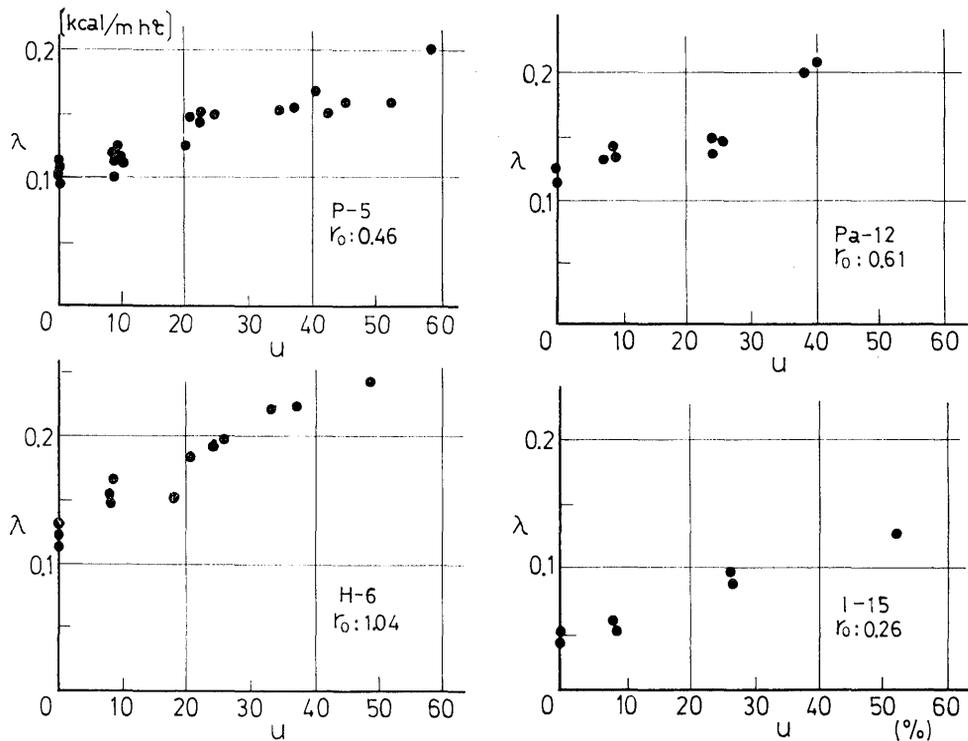


Fig. 6 木質壁用ボードの含水率 ( $u$ ) と熱伝導率 ( $\lambda$ ) の関係  
 Relation between moisture content ( $u$ ) and thermal conductivity ( $\lambda$ ) of wood-based material boards.

$r_0$ : 全乾比重. Specific gravity in oven dry.  
 (P-5), (H-6), (Pa-12), (I-15): Table 1 参照. See Table 1.

$$R_K = \frac{1}{\alpha_F} + \frac{1}{C} + \frac{1}{\alpha_B} = 1/K = \Delta \theta / q \quad \dots\dots\dots(2)$$

とくに均質なボードであるなら、その熱伝導率を  $\lambda$ 、厚さを  $d$  とすると、 $C = \lambda/d$  であるから、

$$R_K = \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_F} + \frac{1}{\alpha_B} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。

したがって、ボードの熱伝導係数  $C$  が既知であれば、 $\alpha_F$ 、 $\alpha_B$  に適当な値をえらぶことによって  $R_K$  あるいは熱貫流率  $K$  を求めることができる。

ボードのように板状の単体の場合、 $\lambda$  または  $C$  は比較的容易に求められる。しかし、表面における熱伝達率  $\alpha$  は、材面の温度、アラサ、形状、接する空気の状態とくに風速等に依存するので正確な  $\alpha$  値を求めることは、かなり困難であることから、一般に  $R_K$  の計算値は実測値と比較すると差異を生ずることが多い。

この  $\alpha$  の木材表面についての実験では、無風状態で  $9 \sim 10 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}^{8)9)}$ 、風速  $v \text{ m/sec}$  との関係では、 $\alpha \div 10 + 3v \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$  程度の値で  $\alpha$  は  $v$  の変化に対し直線的に増加するといわれている<sup>10)</sup>。Fig. 7 は厚さ  $5 \text{ mm}$  のラワン合板 (P-5) を用い、垂直位置で熱が定常的に貫流している際に、合板と空気の界面層における温度勾配を測定して図示したものであるが、これから求めた  $\alpha$  も、前述の値よりやや小

Table 2. ボード類の熱貫流における各部温度と  $C$ ,  $K$  &  $\alpha$   
Temperature at each measuring point and  $C$ ,  $K$  &  $\alpha$  of boards

ボ ー ド Boards	各 部 の 温 度 $\theta$ ( $^\circ\text{C}$ )				熱 量 $q$ Kcal /m <sup>2</sup> h	熱伝導 係 数 $C$ Kcal /m <sup>2</sup> h $^\circ\text{C}$	熱貫流率 $K$ Kcal /m <sup>2</sup> h $^\circ\text{C}$	表面熱伝達率 $\alpha$ Kcal/m <sup>2</sup> h $^\circ\text{C}$		計 算 値 $K'$ Kcal /m <sup>2</sup> h $^\circ\text{C}$
	①	②	③	④				Cold side	Hot side	
P-3	9.7	14.4	18.6	26.3	91.5	21.79	5.51	19.47	11.88	5.24
P-5	9.7	14.6	21.8	29.2	91.3	12.68	4.68	18.63	12.34	4.48
P-12	9.7	14.7	25.2	32.1	91.2	8.68	4.07	18.23	13.21	3.86
Pc-3	9.7	14.8	18.5	27.3	90.3	24.41	5.13	17.71	10.26	5.40
Pa-12	9.6	15.2	25.3	34.0	90.7	8.98	3.72	16.20	10.46	3.91
H-6	9.7	15.2	18.5	26.7	90.7	27.49	5.34	16.50	11.06	5.54
I-15	9.4	13.7	34.2	40.6	63.6	3.10	2.04	14.78	9.93	2.14
W-17	9.5	13.6	29.8	37.4	91.0	5.62	3.26	22.20	11.97	3.10
Ac-6	9.6	14.7	18.3	25.9	91.3	25.36	5.60	17.90	12.01	5.45
Ps-15	9.4	13.2	39.4	46.1	65.2	2.49	1.78	17.16	9.73	1.83
Pl-12	9.7	14.2	22.0	29.6	91.3	11.74	4.58	20.28	12.01	4.35
Si-6	9.6	15.2	20.2	27.4	90.8	18.16	5.10	16.21	12.61	5.02
St-4	9.7	15.4	16.1	23.8	91.5	130.73	6.49	16.05	11.88	6.59
G-3	9.6	14.6	15.2	23.4	90.8	151.45	6.58	16.23	10.33	6.63
Av.	9.6			30.7				17.68	11.41	

① & ④：低温側および高温側空気温度 Air temperature in cold and hot side.  
 ② & ③：低温側および高温側ボード表面温度 Surface temperature of board at cold and hot side.  
 $\theta$ ：Temperature at each measuring point.  $q$ ：Heat flow per unit area.  $C$ ：Thermal conductance.  
 $K$ ：Thermal transmittance.  $\alpha$ ：Surface coefficient of heat transfer.  $K'$ ： $\alpha$  の平均値と  $C$  による計算値  
 Calculated value by using  $C$  and Av. value of  $\alpha$ .

さくなくなったが、ほぼ同様の傾向がみとめられた。

Table 2 に各種壁用ボード類の熱貫流率  $K$  の測定結果を示す。測定条件はボードを垂直に立てた状態で、低温側空気温度を  $10^{\circ}\text{C}$  で制御し、風速  $3.0\text{ m/sec}$ 、高温側空気温度は成り行き、風速  $1.2\text{ m/sec}$  とした。ただし、低温側空気温度の実測値は各データとも  $10^{\circ}\text{C}$  よりやや低めとなり、 $9.4\sim 9.7^{\circ}\text{C}$  の範囲となった。

前述のように測定条件が一定で、ボードの表面熱伝達率  $\alpha$  に大きな差がなければ、 $K$  はボードの熱伝導係数  $C$  の値によることになるので、供試した木質系8種、その他6種のボードのうち  $K$  の最小のものは、 $C$  値の最も小さい厚さ  $13\text{ mm}$  のスタイロフォームと  $2.6\text{ mm}$  の合板との複合板 (Ps-15) で  $K=1.78\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$ 、最も大きかったものは  $C$  値が最大である硝子板 (G-3) で  $K=6.58\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  であった。

木質系では、厚さ  $15\text{ mm}$  のインシュレーションボード (I-15) の  $K=2.07\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  が最も小さく、ついで厚さ  $14\text{ mm}$  の木毛セメント板と  $3\text{ mm}$  の合板を複合したボード (W-17) の  $K=3.26\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$ 、厚さ  $12\text{ mm}$  のパーティクルボード (Pa-12) の  $K=3.72\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  が比較的小さく、スタイロボード (Ps-15) の約2倍程度の値となる。  $3\text{ mm}$  合板 (P-3) の  $K=5.51\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  が当然のことながら最も大で、厚さ  $6\text{ mm}$  の珪酸カルシウム板、同じく  $6\text{ mm}$  の半貫通穴あき吸音板とほぼ同じ値となった。

熱伝達率  $\alpha$  については、ボードのような平板では、形状は一様であるから、接する空気条件を一定にすれば、 $\alpha$  は材面の粗密さなどの性状に依存する材料の特性値として比較し得ることが考えられる。ここでの実測値では低温側表面で  $22.20\sim 14.78\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  の範囲の値をとり、平均値で  $17.68\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$ 、高温側で  $13.21\sim 9.73\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$ 、平均値が  $11.41\text{ Kcal/m}^2\text{ h}^{\circ}\text{C}$  となった。

ボードの表裏両面における熱伝達抵抗の和を  $R_{\alpha}$  とすると、式 (2) より

$$R_K = \frac{1}{C} + \left( \frac{1}{\alpha_P} + \frac{1}{\alpha_B} \right) = R_C + R_{\alpha}$$

$$\therefore R_C/R_K = 1 - R_{\alpha} \cdot K$$

となり、 $R_C/R_K$  と  $K$  との関係は  $-R_{\alpha}$  の勾配の直線で表わされる。すなわち、Fig. 8 で斜めに引いた数本の直線の勾配の絶対値はボードの  $R_C$  と  $R_K$  から求められる表面熱伝達抵抗  $R_{\alpha}$  を表わすことになり、直線に付した数字はその値である。図から、木質系ボードのうちでもパーティクルボード (Pa-12)、ハードボード (H-6) がスレート板 (St-4)、硝子板 (G-3) などとほぼ同程度の  $R_{\alpha}$  値となり、合板 (P-

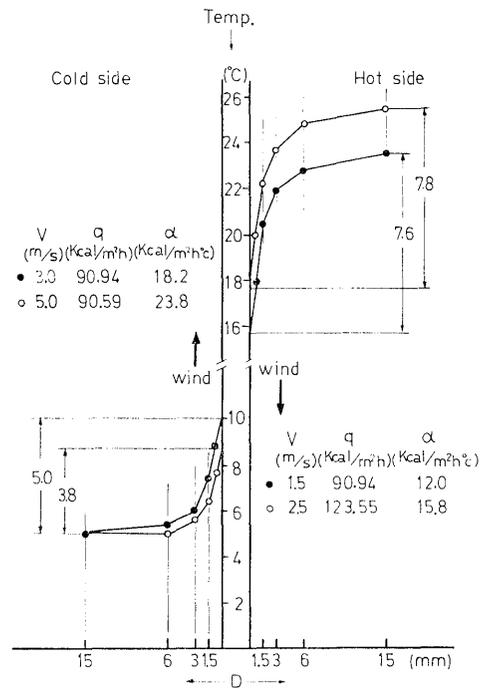


Fig. 7 合板の表面空気層における温度分布  
Temperature distribution in air layer adjacent to the surface of plywood.  
 $V$ : 風速 Wind velocity  
 $q$ : 熱流量 Amount of heat current  
 $\alpha$ : 熱伝達率 Surface conductance  
 $D$ : 合板表面からの距離 Distance from surface of plywood

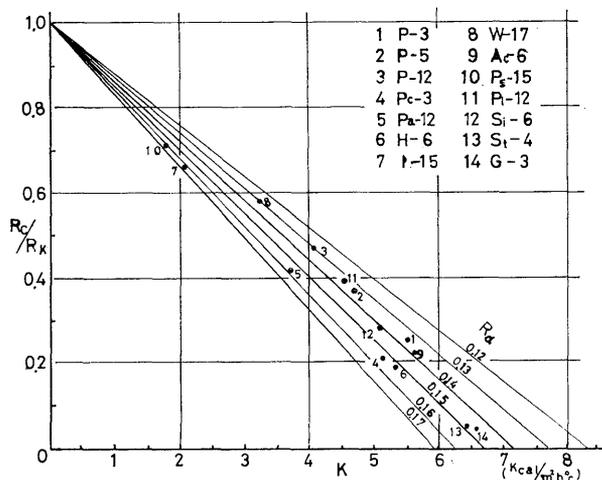


Fig. 8 ボード類の熱貫流率 ( $K$ ) と ( $R_C/R_K$ ) の関係  
Relation between thermal transmittance ( $K$ ) and  $R_C/R_K$  of the test boards.

$R_C$ : Thermal resistance of boards.  
 $R_K$ : Overall thermal resistance of boards.  
 $R_a$ : Thermal resistance of surface.

3, P-5, P-12), 木毛セメント板と合板の複合板 (W-17) のそれはやや小さくなる。クロス張り合板 (Pc-3) では表面に比較的大きい凹凸があるにもかかわらず  $R_a$  はやや大きい値を示した。全体的には、これらのボードにおける両表面の熱伝達抵抗の和  $R_a$  はおおむね 0.13~0.17 Kcal/m<sup>2</sup>h°C の範囲であり、 $R_a$  の大きいボードの表面はいずれも合成樹脂で加工された平滑な面になっており、逆の場合は細い毛羽立ちのような面を有しているものである。

また、Table 2 の  $K'$  は、これらのボードの高温および低温側それぞれについて求めた熱伝達率  $\alpha$  の平均値と各ボードの実測熱伝導係数  $C$  から計算によって求めた熱貫流率であるが、実測熱貫流率  $K$  と最も大きい差があったのはクロス張り合板 (Pc-3) で、比率にして 5.3% であった。したがって、 $\alpha$  は各ボードの特性値で、実験的に求められる値ではあるが、各ボード間の差はそれほど大きいものではなく、風速のあまり大きくない一般的使用状況のもとでは、各ボード間の平均的な値を用いても  $K$  におよぼす影響は 5% 程度であり、熱伝導係数の小さいものでは、その影響は更に小さくなる。

Table 3. 熱貫流における  $R_c$  と  $R_a$  の割合  
Ratio of  $R_c$  and  $R_a$  in thermal transmission test on boards

ボ ー ド Boards	割 合 Ratio (%)	
	$R_a$	$R_c$
(St-4), (G-3)	95	5
(H-6)	85	15
(P-3), (Pc-3), (Ac-6)	80	20
(Si-6)	75	25
(P-5), (Pa-12), (Pi-12)	65	35
(P-12)	60	40
(W-17)	45	55
(I-15)	40	60
(Ps-15)	35	65

Table 3 は各ボードの熱貫流抵抗  $R_K$  に占める熱伝達抵抗  $R_a$  と熱伝導抵抗  $R_C$  の割合を示したものであるが、このようにボード単体の熱貫流における  $R_a$  の割合は大きく、ボードの種類によって  $\alpha$  に大きな差がないとはいえ、 $\alpha$  そのものの熱貫流率におよぼす影響はきわめて大きい。

### 3. 壁パネルの熱貫流率

#### (1) ボードの種類と中空層熱伝達

中空壁では、その熱貫流率を  $K$  として、 $C_F$ ,  $C_B$  を表側および裏側ボードの熱伝導係数、 $C_a$  を中空層の等価熱伝導係数、 $\alpha_F$ ,  $\alpha_B$  を表裏両表面の熱伝達率とすると、

$$K=1/R_K=1/\left(\frac{1}{\alpha_F}+\frac{1}{C_F}+\frac{1}{C_a}+\frac{1}{C_B}+\frac{1}{\alpha_B}\right) \dots\dots\dots(4)$$

であらわされる。 $R_K$  は壁の熱貫流抵抗である。

$C_F, C_B$  はボードが均質であるとみなされるなら、その熱伝導率と厚さから、そうでない場合でも実験的に比較的容易に知り得る。 $\alpha$  も前節の結果から、一般的にはボードの種類によって、とくに大きな変動はないと考えられるので、この場合、中空層の  $C_a$  が問題となる。

周知のように、空気をはさんで平行に向き合った平板間の熱伝達は、放射、対流、伝導によって行われる。その際、平板の性状、中空層の大きさ、厚さ、密閉の程度、鉛直方向との相対位置、熱流方向との関係、温度などが相互に影響しあい、それらの各要素が全伝達量に占める割合も変化し、その結果が各種パネルの特性となってあらわれる。

ここでは、試験用の密閉型中空パネル (90×60 cm、以後、試験用パネルの大きさはすべてこの寸法) を用い、主として、パネルに使用したボードの種類との関連で熱貫流率の解析を試みた。

i) 対流効果

密閉型中空パネルの両面の間に温度差がある場合、高温側ボードに接する空気は暖められて膨張し、密度を減少して上方に向い、低温側では逆に下向することによって、層内空気に自然対流が生じ熱を移動させる。壁体の中空層のように、縦、横方向の長さに対して厚さが非常に薄い空気層では、層の重力方向に対する傾きの程度で層内対流の方向が壁体と相対的な関係で異なってくるため、対流に伴う熱伝達量も変化する。その時の中空層の等価熱伝導係数  $C_a$  は、壁 (層) の傾きが水平で、熱流が上向する場合最も大きく、逆に下向する場合最小となり、壁の傾きが垂直で水平方向の熱流では中間の値をとる<sup>9)</sup>。

この変化傾向の程度が中空壁に用いたボードの性状によって異なるのではないかと考え、合板 (P-5)、ハードボード (H-6)、スレート板 (St-4)、硝子板 (G-3) を用いた中空パネルについて、パネルの傾きによる中空層の等価熱伝導係数  $C_a$  の値をボード裏面間の温度差、通過熱量から求め、その相違を検討した。 $C_a$  には当然、放射、伝導も関与するが、それらの作用はパネルの傾きによらないと考えられるので、この場合の変化量はほとんど対流効果によるものと考えた。

Fig. 9 は空気層の厚さを 6 cm とした密閉型中空パネルで、両面に (P-5) を用いたものは、パネルの傾きが水平方向で下側が高温の上向熱流の

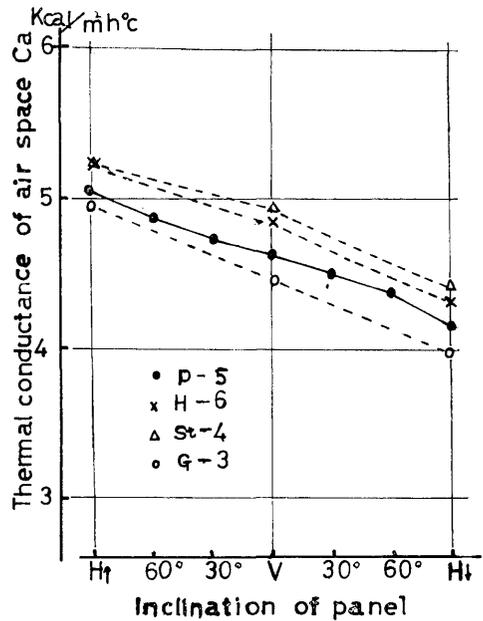


Fig. 9 熱流方向が異なる時の中空層の等価熱伝導係数 ( $C_a$ )

Relation between equivalent thermal conductance of air space core and inclination of panel.

- H↑: 水平位置上向熱流  
Horizontal position, Upward heat flow.
- H↓: 水平位置下向熱流  
Horizontal position, Downward heat flow.
- V: 垂直位置 Vertical position.

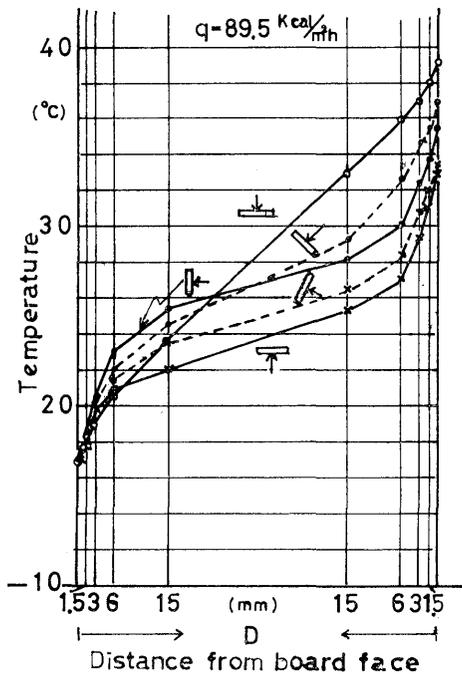


Fig. 10 熱流方向が異なる時の中空層の温度

Temperature distribution in hollow core in each direction of heat flow.

場合から 30° ずつ傾きをかえて、水平方向で下向熱流の場合まで、(H-6), (St-4) および (G-3) については、傾きが水平で上向熱流 (H↑), 垂直で水平熱流 (V), 水平で下向熱流 (H↓) の3条件で  $C_a$  を測定した結果である。

(P-5) における  $C_a$  の値は傾きの変化に伴って、ゆるい S 型曲線傾向を示し、その大きさの変動は傾きが垂直の場合 (V) の値に対して、H↑, H↓ でそれぞれ ± 10% の範囲であった。(H-6), (St-4), (G-3) では、V, H↑, H↓ の場合の測定のみであり、中間の傾きでの値は不明であるが、(H-6), (St-4) では変化傾向が (P-5) とほぼ同様であり、(G-3) では曲線の傾斜がやや大きくなった。 $C_a$  値の大きさは、(St-4), (H-6), (P-5), (G-3) の順となった。

大きさの比較では、当然対流以外の伝達も含まれ、測定温度の影響もあるので、層内対流のみの効果によるとは断定できないが、最も表面の滑らかな (G-3) を用いた場合の  $C_a$  値が最も小さく、裏面が網目状になっている (H-6), (St-4)

Table 4. ボードの種類と中空層の等価熱伝導係数 ( $C_a$ )  
Equivalent thermal conductance ( $C_a$ ) of plane air space of hollow core panels with several kinds of boards

パネル Panels		ボードの裏面温度 $\theta$ (°C)			温度差 $\Delta\theta$ (°C)	熱流量 $q$ (Kcal/m <sup>2</sup> h)	$C_a$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)
低温側 Cold side	高温側 Hot side	低温側 Cold side	高温側 Hot side	平均 Average			
P-3	P-3	13.4	31.8	22.6	18.4	90.4	4.94
H-6	H-6	16.5	35.2	25.9	18.7	92.3	4.94
Si-6	Si-6	14.6	31.1	22.9	16.5	84.1	5.10
G-3	G-3	10.4	29.8	20.1	19.4	89.6	4.62
St-4	PI-12	11.0	27.3	19.2	16.3	83.9	5.15
P-3(B)	P-3(B)	16.0	33.2	24.6	17.2	88.5	5.15
P-3(W)	P-3(W)	16.1	32.9	24.5	16.8	87.2	5.19
P-3	P-3+A1	12.7	47.3	30.1	34.7	81.5	2.35

P-3(B) : P-3 の裏面に黒ペンキを塗付したもの Plywood coated with black paint.

P-3(W) : P-3 の裏面に白ペンキを塗付したもの Plywood coated with white paint.

P-3+A1 : P-3 の裏面にアルミ箔を貼ったもの Plywood with aluminium foil.

$\theta$  : Temperature of back face of boards.  $\Delta\theta$  : Differance of temperature.

で大きく、(P-5) が中間の値をとっていることから、中空層側のボード面の滑らかさが、わずかではあるが層内対流に関係するものと考えられた。なお、Fig. 10 は (P-5) パネルの中空層における温度分布をパネルの傾きとの関係で示したものであり、傾斜位置の場合はいずれも 45° で、熱流方向は矢印で示したようにパネルに垂直である。H↓ 位置での分布はほぼ直線的傾斜を示し、固体伝導における場合と同じようになって、ほとんど空気の動きのないことが推定される。

ii) 放射伝達の影響

互いに平行に向きあっている平板間の空気層における放射熱伝達量は、両面の温度と放射常数  $c$  によってきまる。

Table 5. 各種中空パネルの熱貫流率 ( $K$ ) と熱伝導係数 ( $C$ )  
Thermal transmittance ( $K$ ) and conductance ( $C$ ) of hollow core panels (Thickness of hollow core : 6 cm).

パネ ル Panel		各 部 温 度 Temperature $\theta$ (°C)						熱流量 $q$ (Kcal/m <sup>2</sup> h)	熱伝導係 $C$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	熱貫流率 $K$	計 算 値	
B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	①	②	③	④	⑤	⑥				$C_c$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	$K_c$
(P-3)	(P-3)	5.6	9.5	13.5	31.8	34.3	41.3	90.4	3.57	2.53	3.71	2.25
(P-5)	(P-5)	5.3	10.1	15.0	32.2	37.3	44.6	90.2	3.31	2.29	3.20	2.05
(P-12)	(P-12)	5.0	8.9	19.8	37.0	47.9	52.8	91.0	2.33	1.90	2.30	1.64
(H-6)	(H-6)	7.0	11.9	15.0	33.5	36.7	42.3	93.2	3.75	2.64	3.42	2.14
(P-3)	(Pc-3)	5.2	9.2	11.9	29.9	35.7	40.9	90.1	3.39	2.52	3.69	2.24
"	(Pm-3)*	5.2	9.3	12.6	31.0	34.1	39.6	90.1	3.63	2.61	3.73	2.26
"	(W-17)	5.1	8.9	12.0	30.0	47.0	51.7	90.0	2.36	1.93	1.99	1.48
"	(Ps-15)	5.1	7.8	9.8	23.4	48.3	52.3	65.7	1.62	1.39	1.61	1.26
"	(St-4)	5.1	9.1	11.9	29.8	30.8	36.8	90.0	4.14	2.83	4.02	2.36
"	(Pl-12)	5.1	9.1	12.4	32.0	38.5	43.4	89.9	3.05	2.34	3.26	2.08
"	(Si-6)	5.1	9.4	12.2	30.9	35.2	41.2	90.3	3.50	2.50	3.51	2.17
"	(Ac-6)	5.2	9.3	12.3	30.9	34.7	39.8	90.6	3.56	2.61	3.66	2.23
(P-5)	(Pc-3)	5.1	9.8	15.2	34.5	37.6	43.7	90.7	3.26	2.35	3.42	2.16
"	(Pm-3)*	5.1	9.8	15.4	34.1	37.1	43.0	90.6	3.31	2.39	3.46	2.15
"	(W-17)	5.1	9.7	14.7	32.4	49.3	54.4	90.6	2.28	1.83	1.91	1.43
"	(Ps-15)	5.0	8.3	12.2	24.8	50.6	55.0	66.9	1.58	1.33	1.56	1.23
"	(St-4)	5.1	10.1	15.0	32.7	33.9	39.9	91.0	3.82	2.61	3.70	2.25
"	(Pl-12)	5.0	9.9	14.6	33.6	39.7	45.7	90.3	3.03	2.21	3.05	1.99
"	(Si-6)	5.2	10.3	15.3	33.7	38.1	43.6	89.0	3.21	2.32	3.27	2.08
"	(Ac-6)	5.1	9.8	15.1	33.4	36.4	4.8	89.2	3.35	2.43	2.13	3.39
(St-4)	(St-4)	5.1	9.6	10.7	27.9	29.1	35.4	90.1	4.62	2.97	2.48	4.39
"	(Pl-12)	5.2	9.8	10.9	27.3	33.5	39.6	83.9	3.53	2.43	3.50	2.17
"	(W-17)	5.2	9.8	10.9	29.4	46.2	52.0	91.2	2.50	1.94	2.08	1.53
(Si-6)	(Si-6)	5.2	10.1	14.7	31.0	35.5	41.0	88.7	3.49	2.47	3.33	2.11

注) Remarks) (中空層の厚さ Thickness of core space : 6cm)  
 $q$   $K$  &  $C$  : See Table 2.  $K_c$  &  $C_c$  : Calculated values of thermal transmittance and thermal conductance of panels.  $\theta$  ; Temperature of each part of panel.  
 ① & ⑥ : 低温および高温側空気温度 Air temperature in cold and hot side.  
 ② & ⑤ : 低温および高温側ボード表面温度 Temperature of surface of boards at cold and hot side.  
 ③ & ④ : 低温および高温側ボード裏面温度 Temperature of inside surface of board at cold and hot side.  
 \*メラミン化粧合板 (厚さ 3mm) Melamine over-lay plywood (3mm thick).

一般のボード類の放射率  $\varepsilon (=c/c_0, c_0$  は完全黒体の放射常数) は、よくみがかれた金属面のほかは、木材面も含め 0.8~0.9 の範囲にあり、ほとんど差異がない<sup>10)</sup>。したがって、一般建材用ボード類では種類によって中空層における放射熱伝達量がとくに変化するとは考えられないが、高低両温度をそれぞれほぼ同じようにして、数種のボードを用いたパネルの中空層における  $C_a$  を比較し、Table 4 に示した。

(P-3) パネルの高温側ボード裏面にアルミ箔をはった場合以外は、(P-3) 裏面に白ペンキおよび黒ペンキを塗付したものをも含め、実験的にも  $C_a$  に顕著な差がみられず、ボードの種類によって放射伝達による差異はみとめられなかった。アルミ箔を用いたパネルでは、他のパネルの 1/2 程度の  $C_a$  となった。

## (2) 種々のボードと合板の中空壁

中空層の厚さを 6 cm とした各種ボードと (P-3) および (P-5) との組合せによる中空壁について、熱貫流率  $K$ 、熱伝導係数  $C$  を測定して Table 5 に示した。測定条件は低温側空気温度約 5°C、風速 3.0 m/sec、高温側風速 1.5 m/sec、空気温度成り行き熱流量一定方式である。

この表から、パネル表裏面における熱伝達抵抗の和の平均値を求めると、0.113 m<sup>2</sup>h°C/Kcal となり、各パネル間の変動幅は変動係数にして約 9% となる。中空層の等価熱伝導抵抗は、平均値が 0.200 m<sup>2</sup>h°C/Kcal で、その変動係数は 4% となり、表面の熱伝達抵抗の場合より変動は小さかった。

空気層による熱伝達抵抗の和、即ち、表面の熱伝達抵抗と中空層における等価熱伝導抵抗の和は、平均値で 0.313 m<sup>2</sup>h°C/Kcal となり、貫流率の逆数である熱貫流抵抗の平均値を求めると 0.450 m<sup>2</sup>h°C/Kcal で、その約 70% が空気層によることになる。残りの約 30% がボード類の熱伝導抵抗になる。

両面のボードのみの熱伝導抵抗の比較的大きい組合せでは、(P-12)–(P-12) の 46%、(W-17)–(P-5) の 45% があり、その場合の熱貫流率は 1.89~1.82 Kcal/m<sup>2</sup>h°C となる。この値は寒地向の隔壁、準寒地向の外壁の建築設計基準値<sup>9)</sup> に合致する値である。中空壁では、このように空気層によるほぼ一定の熱抵抗があるので、表面材料に厚目の木質系ボードを用いることによって、かなりな断熱効果が期待できる。

建築設計で取扱われる中空壁の熱貫流率  $K$  は、通常 (4) 式を用いて計算で求められるのが一般的であり、その際、壁が垂直である場合、表面の熱伝達率  $\alpha$  は、室内側は無風状態として  $\alpha_F=8$  Kcal/m<sup>2</sup>h°C、室外側では平均風速 3.0 m/sec の風を想定して、 $\alpha_B=20$  Kcal/m<sup>2</sup>h°C、および中空層の等価熱伝導係数には  $C_a=5$  Kcal/m<sup>2</sup>h°C が用いられる<sup>9)</sup>。表中の  $K_c, C_c$  は、これらの値とボードの熱伝導係数を保護加熱板方式によって実測した値とを用い、計算によって求めた熱貫流率および熱伝導係数である。

実験値  $K$  と計算値  $K_c$  では、高温側 (室内側) の風速設定が異なるため、直接比較することができないので、 $K$  と  $K_c$  の差 ( $k$ ) を求め、各パネルの  $k$  の平均値  $\bar{k}$  を風速の違いによる差とみなし、 $(k-\bar{k})$  の  $K$  に対する百分率を求めて、 $K_c$  と  $K$  の差の  $K$  に対する割合としてみると、一、二のパネルで 15% になるものもあったが、平均では 4.4% であった。 $C$  と  $C_c$  は直接比較してよいはずであるから、 $[(C-C_c)/C] \times 100$  を求めてみると、 $C$  の小さい二、三のパネルで 16% になるものもあったが、平均では  $K$  とほぼ同様に 4.9% となった。したがって、計算によって熱貫流率を求めた場合、実際の  $K$  とは少なくともこの程度、場合によっては、これ以上かなりの差が出るものと考えられる。とくに、熱貫流率の小さい断熱性能のよいものや、ボード表面の極端に粗である場合 (例えば木毛セメント板) などでは、単純な中空壁においても、計算値は実測値と 15~20% の差がでる場合があるものと推測される。

4. 中空層における棧木の影響

空気層の等価熱伝導係数  $C_a$  は、層の厚さが 2 cm 以上ではほぼ一定の値となり、層が垂直で熱流方向が水平の場合、常温で 5.0 Kcal/m<sup>2</sup>h°C 程度の値をとるが、木材の熱伝導係数  $C_w$  は厚さに反比例して小さくなると考えてよいから、気乾材の繊維に直角方向の熱伝導率  $\lambda_{\perp}$  を大きく見積って 0.15 Kcal/m h°C としても、材の厚さが 3 cm であれば、その  $C_w$  は厚さ 2 cm 以上の  $C_a$  と同値となる。建材に用いられる木材は、気乾比重が 0.5 前後のものが多いので、 $\lambda_{\perp}$  は 0.1 Kcal/m h°C 程度であり、 $C_w$  は  $C_a$  よりかなり小さくなるのが一般的である。

Fig. 11 は中空層の厚さが 4.5 cm で、両面に (P-3) および (G-3) を用いた垂直中空パネルでの実験結果である。図中、 $C$  はボードを含むパネルの熱伝導係数である。

棧木は平均比重 0.45、含水率（電気式水分計による）が 6～8% のヒノキ材（2.5×4.5 cm 角）を図に示したような本数で、縦、横ともに均等な間隔で用いた。横軸にとった比は空気層面積に対する棧木の伝熱面積の百分率である。

棧木のように中空層内にあって、部分的に表裏面材を熱的に連結するものを熱橋といっているが、この場合、熱橋である棧木と空気が熱流に対して並列型で作用するものと考えられ、次式によって、棧木を有する中空層の等価熱伝導係数  $C'_a$  が求められる。

$R_a, R_w$  を空気および棧木の熱伝導抵抗,  $A, B$  をそれぞれの伝熱面積比とすると、

$$C'_a = \frac{AR_w + BR_a}{R_a R_w} \dots\dots\dots (5)$$

図中の点線は棧木の平均熱伝導率を 0.1 Kcal/m h°C とし、(P-3) および (G-3) を用いたパネルについて、上式によって計算した値である。

(P-3) パネルは計算値と実験値がよく一致し、(G-3) ではやや計算値を下まわる値となったが、この場合、棧木とボード面との接触状態の良否に起因したものと考えられ、一般的に、棧木と面材の密着性が良好であるなら、棧木間隔が 40～10 cm で木製棧木を井型に用いた壁パネルの熱伝導係数は、これらの結果から、上式による並列合成値と表面材の値から得られる計算値と実験値は、かなりよく一致するものと考えられた。

実際の壁体の場合、棧木間隔は図で縦・横各 1 本の棧木が十字形に入った程度となるので、3 mm 合板を用いた中空壁に棧木がある場合とない場合では、前者で熱伝導係数  $C$  が 2～3% 小さくなるものと

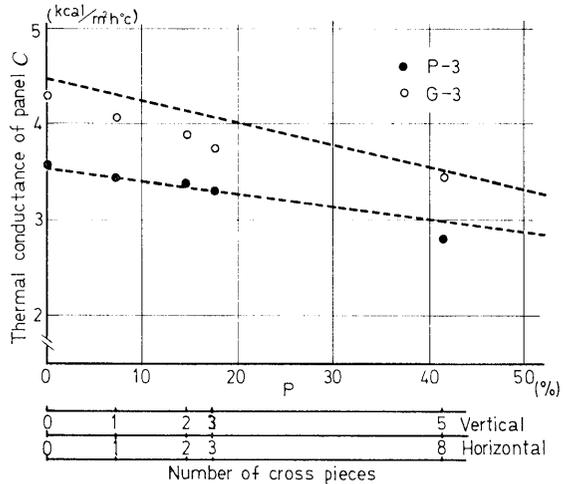


Fig. 11 パネルの熱伝導係数 (C) と棧木の数および空気層との伝熱面積比の関係 (中空層の厚さ: 4.5 cm)

Relation between thermal conductance of panel and number of cross piece and ratio of area of cross piece to overall conducting heat area (Thickness of core space: 4.5 cm).

P: 棧木面積の全伝熱面積に対する百分率  
Percentage of area of cross piece to overall heat conducting area.

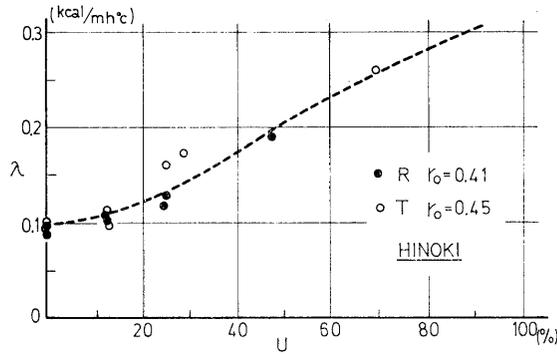


Fig. 12 ヒノキ材の含水率 ( $u$ ) と熱伝導率 ( $\lambda$ )  
Relation between moisture content ( $u$ ) and thermal conductivity ( $\lambda$ ).  
R : 半径方向 Radial direction.  
T : 接線方向 Tangential direction.

Fig. 13 椀木の含水率が異なる場合の、椀木の占有比 ( $S_w/S_a$ ) とパネルの熱伝導係数の変化率 ( $\Delta C/C$ ) の関係 (計算値)  
Relation between change of thermal conductance of panel ( $\Delta C/C$ ) and occupation ratio ( $S_w/S_a$ ) of cross piece to air space at the different levels of moisture content [by calculation].

D : 中空層の厚さ  
Thickness of core space

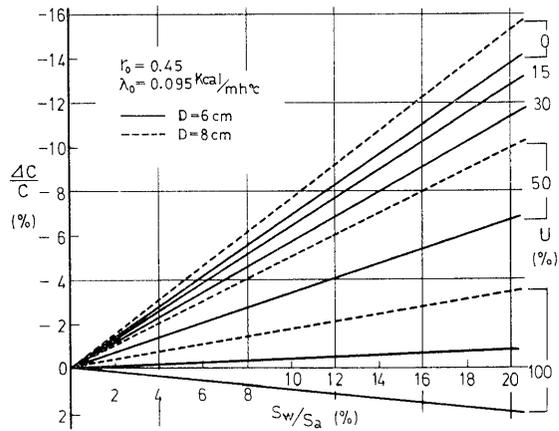


Table 6. 軽量型鋼製と木製椀の比較

Comparison of thermal conductance and transmittance of hollow core panels with wooden cross piece and light steel beam

パ ネ ル Panel	K (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	C		$\theta$ (°C)				q (Kcal/m <sup>2</sup> h)
		C	C <sub>c</sub>	①	②	③	④	
(P-3)+(C P W)+(P-3)	2.44	3.20	2.91	6.3	10.4	37.9	42.3	87.9
(P-3)+(C P I)+(P-3)	2.68	3.57	4.43	6.4	10.3	35.1	39.3	88.5

注) Remark)

(C P W) : 木製椀木 Wooden cross piece.

(C P I) : 軽量型鋼製椀木 Cross piece made of light steel beam.

K : 熱貫流率 Thermal transmittance.

C : 中空部分の熱伝導係数 Thermal conductance of panel with out cross piece part.

C<sub>c</sub> : 椀木部分の熱伝導係数 Thermal conductance of cross piece part of panel.

①, ④ : 低温および高温側空気温度 Air temperature in cold and hot side.

②, ③ : 低温および高温側パネル表面温度 Surface temperature of panel at cold and hot side.

推定される。

木製棧木は木材の熱伝導率 $\lambda$ が比較的小さいので断熱効果があるわけであるが、棧木の含水率 $u$ が増加すると、 $\lambda$ も大きくなり、その効果が低減される。前述のように、棧木がある中空層の $C'_a$ については空気と棧木の並列型の計算値と実験値がよく一致することから、Fig. 12に示した木材の $u$ と $\lambda$ の関係(実測値)を用い、棧木の中空層における占有面積率との関係で、 $u$ による遮熱効果の低減を計算で求めFig. 13に示した。実際の木質系壁体の中空層における棧木の占有面積率は8~12%程度であるから、中空層での遮熱効果は層厚が6cmの場合、棧木の含水率 $u$ が0~15%、すなわち全乾~気乾の範囲で $C_a$ の5~8%となるが、生材の含水率状態である $u=80\%$ では、その効果がほぼ0となり、それ以上の $u$ で負の効果を示すことになる。

#### 5. 中空層における軽量型鋼製の棧の影響

前述のように木製棧木は、一般に中空層の等価熱伝導係数 $C_a$ を小さくする効果があるが、軽量型鋼が棧木に用いられている場合は、いわゆる熱橋となって、当然、逆の効果が現われることが予想される。

Table 6は(P-3)を両面に用いた中空パネルの中空層にC型軽量型鋼( $A=60$ ,  $B=20$ ,  $C=10$ ,  $t=2.5$ )で作った十字形の棧を入れた場合と、同形の木製棧木(ヒノキ材,  $r_u=0.45$ ,  $u=8\%$ )を用いたときのパネルの熱伝導係数 $C$ と熱貫流率 $K$ を同一条件で測定した結果である。表中の $C$ は中空部分4か所の平均値であり、 $C_c$ は棧木部分の値である。表から両者の $C$ および $K$ を比較すると、それぞれ約10%の差があり、 $C_c$ では木製棧木に対して約50%の差で型鋼棧のパネルが大きくなる。

いま、型鋼棧の断面積を $0.25 \times 6 \text{ cm}^2$ 、 $\lambda=40 \text{ Kcal/m h}^\circ\text{C}$ とし、(P-3)と完全に接触しているとして、並列計算をすると、 $K=3.33 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ 、 $C=5.88 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ になり、実験値とは著しく相違するので、計算値を得ることは無理のようであり、実験的に求めるしかない。また、軽量型鋼棧の場合、型鋼の熱伝導抵抗が極端に小さいので、棧と表面材との接触性の良否によって、 $C_c$ 値にかなりの変動があるはずであり、その影響も大きいと考えられる。ここでの接触状態は、単に表面材で型鋼棧を圧着しただけであるが、実際の場合も同程度と思われるので、軽量型鋼が棧木に用いられている壁体熱貫流率は、木質系に対し、おおむね数%大きくなるものと推定される。

#### 6. 中空層における断熱材の影響

等価熱伝導抵抗の値が約 $0.2 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/Kcal}$ である中空層は壁体の断熱性にかなり有効であるが、さらに断熱効果を高めるために、その一部に断熱材を充填することがよく行われる。

その際、断熱材の充填位置は、1) 中空層の高温側、2) 中空層を2分する中央部分、3) 低温側となるが、このことは単に断熱性能だけでなく、壁体断面における温度分布を変えるため、結露現象にも影響をおよぼすことが予想される。

試験パネルは、枠幅8cmの木枠の両側に4mm合板を用いた中空パネルの中空層に厚さ3cmの発泡スチロール板を断熱材として充填したもので、前述の3通りの場合を作った。したがって、その断面構成はFig. 14に示したようになる。Table 7はその実験結果である。

この構成での熱貫流率を試算すると、パネル両表面の熱伝達抵抗の和( $R_a$ )を $0.15 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/Kcal}$ 、空気層の等価熱伝導抵抗( $R_a$ )を $0.2 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/Kcal}$ 、断熱材および2枚の4mm合板の熱伝導抵抗をそれぞれ $R_g=0.86$ 、 $R_p=0.045 \times 2=0.09 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/Kcal}$ と見積ったとき、図の①および③の場合、すなわちどちらかの表面材に断熱材が密着している場合は、ほぼ $0.77 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ 、中空層が2分される②の

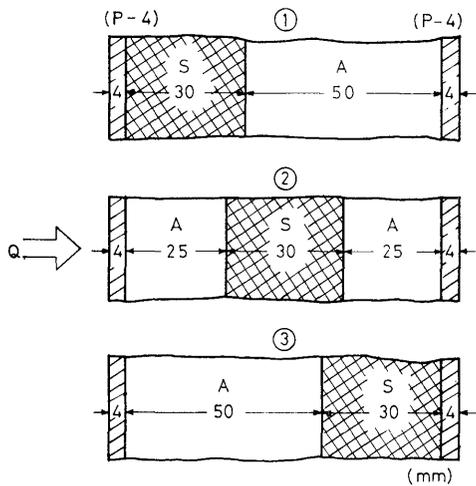


Fig. 14 断熱材充填パネルの断面  
Cross section of test panel with thermal insulator.

S : Insulator.  
A : Air space.

場合が  $0.67 \text{ Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  として計算上の熱貫流率が得られる。

この値との対応で測定値を検討してみると、①の場合が計算値に最も近い値となり、②、③では測定値がやや大きな値になった。表中、 $C_a$ とあるのが空気層の等価熱伝導係数であるが、 $C_s$ で示されている発泡スチロール板の熱伝導係数が、ほぼ一定の値をとっているのに比べ、試験体の置き方、熱流方向の違い、断熱材の充填位置の相違で、 $C_a$ にはかなりの変動がみられ、熱貫流率  $K$  の変化の主要因になっていることがわかる。

これは、断熱材が用いられている壁体の中空層は、断熱材の熱伝導抵抗  $R_s$  が大きいため、その充填位置によって作られる空気層の平均温度が大きく変化し、 $C_a$  に影響するためと考えられる。

Table 7. 断熱材の充填位置と熱貫流率の変化  
Change of thermal transmittance of panels due to the setting position of insulator

パネル Panel		$K$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	$C$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	$C_c$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	$C_a$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)	$\theta_a$ (°C)	$C_s$ (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)
①	V	0.763	0.824	0.898	4.61	15.0	1.114
	H↓	0.751	0.792	0.877	3.62	14.0	1.139
	H↑	0.774	0.832	0.918	4.63	13.5	1.130
②	V	0.701	0.752	0.822	L 4.74 H 5.90	11.6 49.8	1.195
	H↓	0.702	0.745	0.818	L 4.65 H 6.52	11.7 50.3	1.172
	H↑	0.735	0.786	0.862	L 5.60 H 7.98	10.8 48.7	1.165
	V	0.804	0.889	0.954	6.60	46.2	1.141
	H↓	0.796	0.867	0.942	6.37	49.9	1.105
③	H↑	0.825	0.909	0.988	6.21	45.9	1.174

注) Remarks)

- V : 垂直位置水平熱流 Vertical position, horizontal heat flow.
- H↓ : 水平位置下向熱流 Horizontal position, downward heat flow.
- H↑ : 水平位置上向熱流 Horizontal position, upward heat flow.
- $K$  : 熱貫流率 Thermal transmittance.
- $C$  : 熱伝導係数 Thermal conductance.
- $C_c$  : コア一部分の熱伝導係数 Thermal conductance of core.
- $C_a$  : 空気層の熱伝導係数 Thermal conductance of a plane air space.
- $\theta_a$  : 空気層の平均温度 Mean temperature of a plane air space.
- $C_s$  : 断熱材の熱伝導係数 Thermal conductance of heat insulation.

したがって、断熱的には、比較的溫度變動の少ない室内側に空氣層を作るほうが、安定した性能が得られ、かつ計算による推定値もかなり正確になるものと思われる。

V 二、三の試作パネルの熱貫流率

中空層の断熱効果、パネル表面の大きな凹凸および、パネルの継目に隙間が生じた場合の影響を検討するために試作的に構成したパネルについての実験結果をここで述べる。

1. 薄い合板の3, 4重壁

中空層を厚さ方向に薄い合板を用いて分割して、複数の空氣層を作ることによって、中空層の断熱効果を高めることが考えられる。

この場合、中空層を厚さ方向に分割するので、その熱伝導係数  $C$  は合板と空氣層の直列型で表わせるから、 $C$  は

$$C = 1 / \left( \sum \frac{1}{C_a} + \sum \frac{1}{C_w} \right) = 1 / (\sum R_a + \sum R_w) \dots\dots\dots(6)$$

である。

ここで、 $C_a$ 、 $C_w$  は空氣層および合板の熱伝導係数、 $R_a$ 、 $R_w$  はそれぞれの熱伝導抵抗である。

空氣層は厚さが約 2 cm 以上で  $C_a$  はほぼ一定の値をとるようになるが、それ以下では厚さが小さくなるにしたがって急増する<sup>10)11)</sup>。Fig. 15 に示す (P-3)、(G-3) を用いた実験結果でも、その傾向がよくわかる。したがって、壁体のように厚さが定まっている場合、分割する数が多くなるにしたがい、当然一層の空氣層の厚さは 2 cm 以下となって、その  $C_a$  はかなり急速に増加することになる。このような中空層 (コアスペース) の熱伝導抵抗を  $R$  とすると、

$$R = \sum R_w + \sum (R_a) = \sum \frac{d_w}{\lambda_w} + \sum (k R_a') \dots\dots(7)$$

ここで、 $R_w$ 、 $\lambda_w$ 、 $d_w$  は合板の熱伝導抵抗、熱伝導率および厚さで、 $R_a'$  は空氣層の厚さが 2 cm 以上で、一定になったときの等価熱伝導抵抗、 $k$  は空氣層の厚さに関する係数で 2 cm 以上では 1、それ以下では実験的に求められる値である。

式 (7) の合板に関する  $\sum R_w$  あるいは  $\sum \frac{d_w}{\lambda_w}$  は層数  $n_a$  が増すとともに比例的に増加するが、空氣層の等価熱伝導抵抗  $R_a$  の項は、一層当りの厚さとの関係で、係数  $k$  が急減するため  $\sum (k R_a')$  は  $n_a$  に関して上に凸形の変化を示し、合成値  $R$  は極大値をもつ。そのときの  $n$  が断熱的にもっとも有利な層数となる。Fig. 16 は中空層の厚さを 6 cm として、3 mm 合板 ( $\lambda=0.1$  Kcal/m h °C) で分割した場合を推定したのであり、 $R_{max} = 1.75$  m<sup>2</sup> h °C/Kcal そのときの合板の数  $n$  が 13、1 空氣層の厚さは 4.3 mm となる。

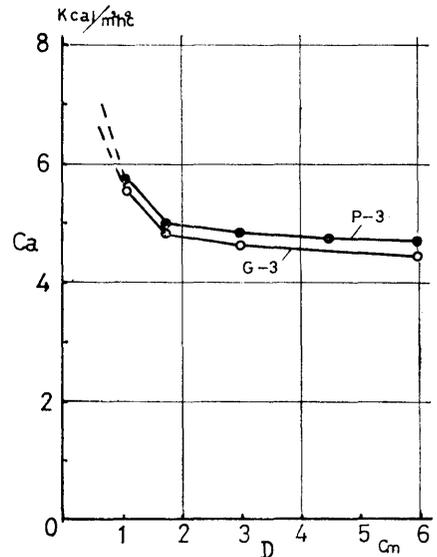


Fig. 15 中空層の厚さ (D) と等価熱伝導係数 (Ca)

Relation between thickness (D) and equivalent thermal conductivity (Ca) of hollow core.

Fig. 17 は実用的に可能と思われる分割数として、 $n_a=2$  (合板 3 重壁)、 $n_a=3$  (合板 4 重壁) の場合の垂直パネルの実験結果である。

図の (a) の 3 重壁の場合の  $C'$  は、厚さが 2 cm 以上で一定した空気層の等価熱伝導係数  $C_a'$  ( $\approx 5.0$  Kcal/m<sup>2</sup>h°C) のほぼ 1/2 となったが、(b) では、各空気層の厚さが 1.8 cm となるので、それらの等価熱伝導係数は  $C_a'$  よりやや大きくなり、とくに高温側の空気層ではかなり大きく、 $C'$  は 1/3  $C_a'$  より約 10% 大きくなり、温度の影響がかなりあるものと考えられた。

2. 薄い板の上に断面が矩形および三角形の角材を一定間隔で並べたパネル

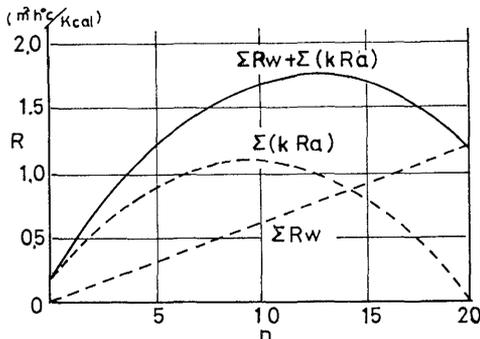


Fig. 16 平板の数 ( $n$ ) とコアスペースの等価熱伝導抵抗 ( $R$ ) (計算値)

Relation between number of boards ( $n$ ) and thermal resistance ( $R$ ) of core space at multi-layer panel.

試験体は厚さ 5.5 mm のラワン合板 ( $r_u=0.63$ ,  $u=8\%$ ) の上に断面が  $2.5 \times 7.0$  cm の矩形およびそれと面積が等しい底辺 7.0 cm、高さ 5.0 cm の 2 等辺三角形材 (ラワン,  $r_u=0.64$ ,  $u=8\%$ ) を 3 cm の間隔で並べ、接着剤を用いて接合したものである (Fig. 18)。

この実験は間伐材利用の校倉型の壁のように表面に大きな起伏のある場合を想定して、表面の影響を求めたものであり、合板面を高温側にし、風速は 1.2 m/sec 一定、起伏面を低温側にして、風速は 2, 3, 4, 4.5 m/sec と変化させた。風向は角材と直交する方向である。壁の有効面積は  $50 \times 80$  cm, 角材の数

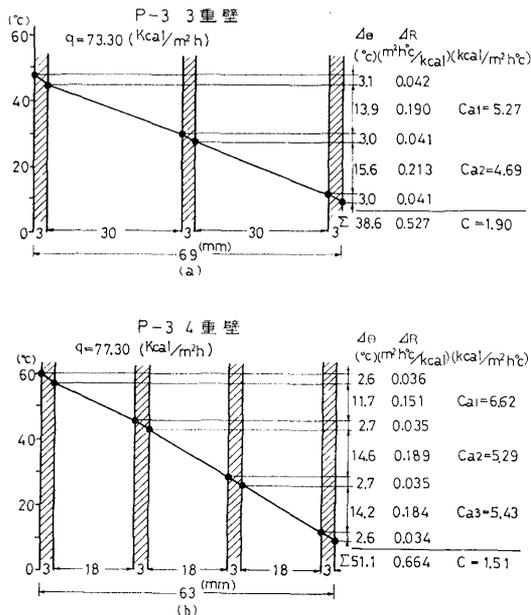


Fig. 17 (P-3) の 3・4 重壁の測定結果  
Measuring results of 3 and 4 layers panel with (P-3).

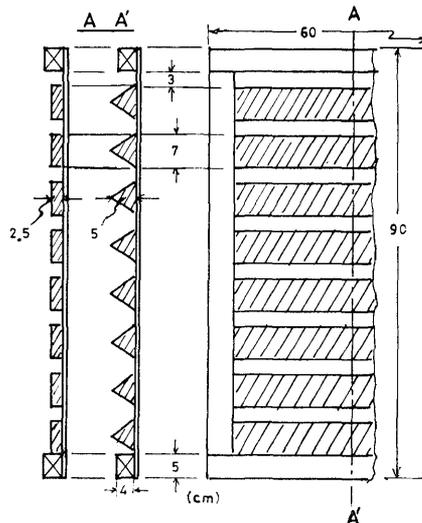


Fig. 18 (P-5) の上に角材を並べた  
パネル  
Panel with timber strips.

はいずれも8本である。角材の断面積の合計は140 cm<sup>2</sup> となるので、材積的には厚さ1.75 cmの板材を合板の上に隙間なく並べた場合と同等になる。

Fig. 19 に測定結果を示す。図の直線(c)は角材と同じ比重の合板 ( $d=12$  mm,  $r_u=0.64$ ,  $u=8\%$ ,  $d=5.5$  mm,  $r_u=0.63$ ,  $u=8\%$ ) を用い、厚さ17.5 mmの平板にして熱貫流率  $K$  を求めた場合で、点線で示した直線(d)は矩形角パネルの熱伝導係数  $C$  を角材部と合板部の並列合成値として求め、表面熱伝達率  $\alpha$  に平板の場合の値を用いた計算値である。

試作パネルの  $K$  は、おおむね並列計算値であらわされるようであるが、風速が小さくなるにしたがって並列計算値との差が大きくなる傾向がみられた。体積が等しい平板と比べると、平均的に約10%大きい値となるが、無風状態ではほとんど差がなくなるものと推定された。矩形材と三角材では後者の  $K$  値がやや大きくなり、風速が変化しても両者の関係に変化はみられなかった。

3. 壁パネルの継目等に生ずる隙間の影響

壁体自体に隙間が生ずることは、きわめて少ないことであるが、木質部材では、壁パネルの継目、引き戸と柱との合せ目等に隙間が生ずる場合が皆無であるとはいえない。そのような場合、隔壁としての断熱性能が著しく低下することが容易に考えられるので、隙間幅の大きさと壁体の熱貫流率との関係を求めた。

試験体は枠幅8 cmの木枠に厚さ12 mmの合板(P-12)を表裏面材とした中空パネルを中央で縦に2等分し、中空層部を密閉型とするため鋸断した端部を短冊形の(P-12)でふさぎ、幅が標準のもの1/2の中空パネルを隙間を隔てて2枚連結した型とした。

実験は供試パネルが垂直と水平の場合について、垂直の場合では壁に沿う風速を2通りに変え、水平の場合は熱流方向の上向きと下向きの2

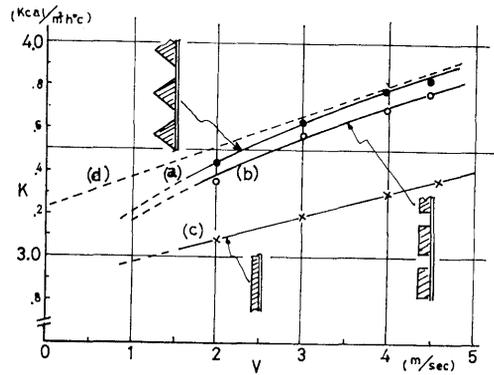


Fig. 19 (P-5) の上に角材を並べたパネルの測定結果

Result of panel with timber strips.

K: 熱貫流率 Thermal transmittance.  
V: 風速 Wind velocity.

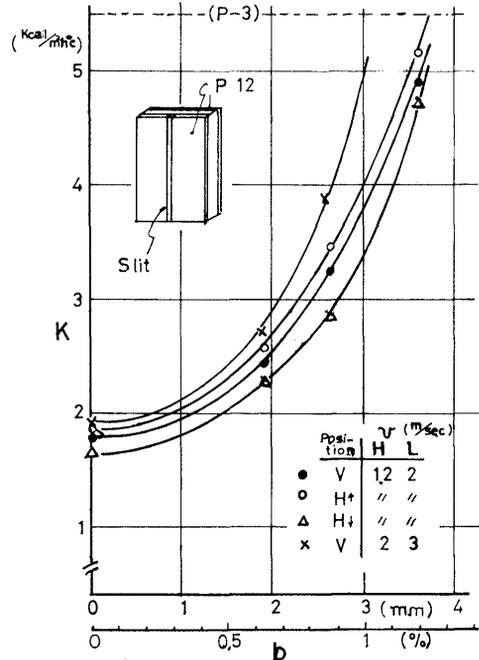


Fig. 20 すき間の幅 ( $b$ ) とパネルの熱貫流率 ( $K$ ) の関係

Relation between width of slit ( $b$ ) and thermal transmittance ( $K$ ) of panel with slit.

V: 垂直位置水平熱流  
Vertical position, horizontal heat flow.  
H↑: 水平位置上向熱流  
Horizontal position, upward heat flow.  
H↓: 水平位置下向熱流  
Horizontal position, downward heat flow.  
H, L: 高温および低温側 Hot side, cold side.

通りを行った。

Fig. 20 はその測定結果である。隙間幅が 1 mm で、有効パネル幅に対する比率にして 0.3% 以下であれば、1～2 m/sec 程度の風があっても熱貫流率  $K$  に及ぼす影響は試験体の位置にかかわらず隙間がない場合の値に対して、最大 10% 程度にとどまる。それ以上の隙間幅になると、急にその影響は増大し、風の影響も付加する傾向がみとめられた。パネルの位置が水平で熱流方向が下向きの場合、その傾向が他の場合に比べてやや緩慢であるが、隙間幅が 3.5 mm、比率にして約 1% 以上になると、同じ傾向を示した。図中、(P-3) とあって破線で示した  $K$  の値は 3 mm 合板単体の実験値で、比較のためにのせたものであるが、両面が (P-12) の中空パネルでも継目等に貫通した隙間があって、その幅が 4 mm、比率にして 1.2% 程度になると、 $K$  は (P-3) 単体なみに低下し、隙間幅がそれ以上になると、もはや熱的には隔壁の用をなさなくなるといえる結果となった。

## VI あとがき

木造家屋の壁体の基本的構造である中空壁と、それを構成する木質ボード類について、熱貫流率の測定を行った。データは特定の雰囲気条件におけるものがほとんどで、やや不十分ではあるが、断熱設計の基礎的資料として有効なものであると考える。また、二、三の特殊なパネルを作り、合板の 3・4 重壁、校倉型の凹凸パネル、パネル隙間の影響についてもデータを示した。

木質ボード類の熱貫流特性においては、ボード表面の熱伝達特性がかなり重要な役割をするため、さらに表面の形態はもとより、木質材料の特性である吸脱湿性との関連で実験を重ねる必要性を感じた。最近、断熱施工が普及、向上するとともに、多発する結露障害への対応も考慮しながら、木質系壁体の有効性を材料の表面熱伝達の観点から追求していきたいと考えている。

## 引用文献

- 1) ASTM Designation : C 177-45
- 2) SCHRÖDER, J. : Apparatus for Determining the Thermal Conductivity of Solids in Temperature Range from 20~200°C. The Review of Scientific Instruments. 34, No. 6, p. 615~621, (1961)
- 3) ASTM Designation : C 236-66
- 4) MAKU, T. : Studies on the Heat Conduction in Wood. Wood Reseach. No. 13, (1954)
- 5) Kollman, F. : Technologie des Holzes. Auf. 2, Bd. 1, p. 1050, (1951)
- 6) Kollman, F., Malmquist, L. : Über die Wärmeleitzaal von Holz- und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff. Heft. 6, p. 201~204, (1956)
- 7) OHNUMA, K. : Same Experiment of Measuring the Thermal Diffusivity of Hard Board. 木材誌 Vol. 13, No. 4, p. 121~125, (1957)
- 8) 井阪三郎 : 木材表面境界層における熱および水分の移動, 北海道大学農学部演習林報告, Vol. 25, No. 1, p. 123, (1967)
- 9) 渡辺 要 : 防寒構造 理工図書, (1957)
- 10) 建築設備大系編集委員会 : 建築設備大系 1, 彰国社, (1965)
- 11) 芝 亀吉 : 物理常数表, 岩波書店, (1948)

**A Study on the Wood-based Components for prefabrication  
of Wooden Houses Report IV  
A study on the thermal transmittance of wood-based wall panels**

Hisayoshi SAITO<sup>(1)</sup>

Summary

The purpose of this study was to obtain information on the heat insulation of wall panels for wooden houses.

Wood-based boards, inorganic material boards, hollow core panels composed of these boards and several special wall panels were studied on their thermal transmittance with modified ASTM model equipment (Fig. 1).

The results were summarized as follows :

1) Relation between thermal conductivity ( $\lambda$ ) and moisture content ( $u$ ) of wood-based boards.

It has been reported that the thermal conductivity of wood and wood-based materials increases proportionally to the moisture content. The results of the present study showed the same relation of  $\lambda$  vs.  $u$  as mentioned above and these boards gave values about 50% higher than those of the air dry condition at 30% moisture content.

2) The thermal transmittance of boards.

The thermal transmittance of sample boards is shown in Table 2. The temperature distribution in the air layer adjacent to the plywood surface is presented in Fig. 7. As for the thermal transmittance of boards, the surface conductance plays an important part. The proportion of the surface thermal resistance ( $R_a$ ) and the thermal resistance of boards ( $R_c$ ) to the overall thermal resistance ( $R_k$ ) is shown in Table 3.

The surface thermal resistance of boards was 0.12~0.17 mh<sup>2</sup>C/Kcal (at a wind velocity of 1 m/sec on the face, and 3 m/sec on the back).

3) Thermal transmittance of panels :

a) Hollow core panels.

The equivalent thermal conductance of plane air space in the panels hardly varies with the kind of board material except reflective metal foil, under ordinary temperature conditions.

Therefore, we could also have a fairly accurate estimation of the thermal transmittance of panels. The thermal transmittance of hollow core panels composed of plywood and other boards is shown in Table 5.

b) Hollow core panels with wooden cross pieces.

In general, a dry wooden cross piece takes part in the heat insulation of the panel when it is set in the air space of the panel.

The thermal resistance  $R_a$  of an air space with a cross piece is given by following equation.

$$R_a = \frac{r_a r_w}{Ar_w - Br_a}$$

Received March 11, 1980

(1) Wood Technology Division

where  $r_a$  : the thermal resistance of the air space,  $r_w$  : the thermal resistance of the wooden cross piece, and  $A$  and  $B$  : the occupation ratios of the air and the cross piece in the panel ( $A+B=1$ ).

The values of the thermal resistance of the air space with a wooden cross piece could be calculated with this equation and they agreed well with their experimental values.

A moist wooden cross piece brought about an increase of the thermal conductance of the panel. The relation between the thermal conductance of the panels and the occupation ratios of wooden cross pieces is shown in Fig. 13.

c) Panels with a C type frame cross piece of light steel.

It was very difficult to calculate the thermal transmittance of the panel because the contact between the board and the cross piece was not uniform. The thermal transmittance of the panel with a wooden cross piece was ten percent lower than that of the panel with a light steel cross piece (Table 6).

d) Effect of thermal insulator in the air space.

The experimental values of the thermal transmittance and the conductance of the panel (Fig. 14) composed of 12 mm thick plywood, a 50 mm thick air space, and a 30 mm thick polystyrol foamed board are shown in Table 7.

The equivalent thermal conductance of the air space ( $C_a$ ) varied more broadly than that of the polystyrol foamed board under the condition of varying temperature. And so, it is certain that the thermal transmittance of a panel with an air space on the room side gives better insulation performance.

4) Thermal transmittance of some specially designed panels :

a) Panels with 2 and 3 air layers.

The thermal resistances were obtained by summing up the resistance of each air space. The experimental results of panels composed of plywood with 2 or 3 air layers are shown in Fig. 16.

The experimentally obtained thermal resistance ( $R$ ) of these panels agreed well with the values derived from the calculation. However, when we obtained  $R$  by the calculation, the average thermal resistance of each air space for variable temperatures in the board was used.

It was found that the thermal resistance of the panel composed of 4 sheets of plywood and 3 air layers of 1.8 cm thickness was equivalent to that of the plywood with the same thickness.

b) Panel with timber strips.

A sketch of the test panel is shown in Fig. 18. The experimental values of thermal transmittance of the panel agreed with the values calculated by the following equation.

$$K = 1 / \left( \frac{r_b r_t}{r_b + r_t} + 2r_a \right)$$

where  $r_b$  : thermal resistance of the board area,  $r_t$  : thermal resistance of the timberstrips area,  $r_a$  : surface thermal resistance of the plane wooden board.

However, the difference of both values tends to be larger at the range of low wind velocity.

c) Panel with a slit.

The relation between the thermal transmittance of the panel with a slit and the width of the slit (hollow core panel composed of 12 mm thick plywood) is shown in Fig. 21.

It was found that the thermal transmittance was affected by a slit of more than 1 mm and that the effect increased with the width of the slit. When the slit was 4 mm-wide, the thermal transmittance of the panel was reduced to the value of 3 mm thick plywood.