

## 放射加熱による合板の炭化

上 杉 三 郎<sup>①</sup>

Saburo Uesugi: Charring of Plywood by Radiation Heater

**要 旨**：火災時の火源から面材料への熱伝達は、放射（ふく射）、伝導、対流によるが、実火災での熱的影響は放射に最も大きく依存する。この実験では電気ヒーターによる放射加熱によって、木質系の、特に内装材料として代表的材料であるラワン合板が、各種の加熱温度によって与えられた熱エネルギーに対して、どの程度の熱損傷を受けるかを、炭化深さの比較によって基礎的に検討した。

その結果、空気の供給と流れが制限された加熱条件の下では、①合板の炭化深さはヒーターの設定温度が同じならば、ある深さまでは合板の厚さに無関係に試験体（合板）に流入する熱エネルギー量に比例する。②炭化速度は流入する熱エネルギーの総量よりも単位時間当たりに供給される熱エネルギー量に比例する。③ヒーターの設定温度が低いと炭化速度は遅く、炭化開始までの時間は長くなり、設定温度が高いと炭化速度は速く、炭化開始までの時間は短くなる。④黄褐色に変色した部分と炭化部分を分離して熱重量変化を測定した結果では、変色した部分は熱分解がまだ不完全であることから、炭化深さは変色部分を含めない方が適切であることが明らかとなった。

これらの結果は、火災時における木質材料の防火安全性能としての有効厚さを決定する基礎資料となる。

### 1. はじめに

建築物の中では、面を構成する材料に要求される諸性能の一つに、防火性または防火安全性が挙げられる。しかしながら、木材または木質材料で面が構成された場合、それらが可燃物であることから、防火性能に関する評価は低い。むしろ防火安全性能評価の立場からは危険物の対象として積算され、実際の使用・用途範囲を制限されている。危険物の対象とされる根拠は、可燃物であるということであるが、その「危険」の程度はどれほどであるのか知る必要がある。これまでに幾つかの物理的性質および法的規制にもとづく性能試験の結果については、すでに多くのものがあるが、実火災に対応した防火性能については少ない。実火災の研究が近年進展し、新しい観測機器の発達で物理的諸現象も把握され、実験に応用されはじめている。ここでは実火災の現象の一部分を想定し、木材および木質材料の防火安全性能評価を行う基礎データを得るために本実験を行った。

火災の火源は火炎であるが、この実験では炎に触れない距離にある材料が、主に放射熱によって、どの程度の熱損傷を受けるのかを検討するのが目的である。そのために火炎によらない加熱方法として、ここでは電気ヒーターによる放射熱によって、合板がどの程度の深さまで炭化するのかを、合板に流入する熱エネルギー量との関係で検討を加えた結果をまとめて報告する。

### 2. 実 験

#### 2-1 実験材料および実験装置

実験材料は市販のラワン合板Ⅰ類のものである。ここでのラワン合板とは、東南アジア産広葉樹で、主

にメラランチ類によって構成される合板の一般名である。厚さと単板構成は、7.5 ミリ (5 プライ, 1.5+1.5 +1.5+1.5+1.5 ミリ), 9 ミリ (5 プライ, 1+3+1+3+1 ミリ), 12 ミリ (5 プライ, 1.5+3+3 +3+1.5 ミリ), 15 ミリ (7 プライ, 1+3+2+3+2+3+1 ミリ), 18 ミリ (7 プライ, 1+3 +3.5+3+3.5+3+1 ミリ) で、面積は 11.5×11.5 ミリである。この試験体を 20 °C, 50% R・H で 6 か月以上養生した。

2-2 加熱方法

加熱は石英管ヒーター (容量 1.5 KW) を 8 本配した電気加熱炉を用いた。合板の試験体はヒーター表面から 70 ミリの位置に垂直に支持されている。熱を受ける面積は 100×100 ミリである。試験体とヒーターの間にシャ閉板を設けてある。ヒーターの出力を放射する熱エネルギー量で制御することが困難であるので、Fig. 1 の K1 で示す位置のクロメルアルメル熱電対 (K: 旧記号 CA の熱電対) による温度測定で制御した。試験体に流入する熱エネルギー量は熱流計 (昭和電工製水冷式ヒートシンク型熱流センサー) によって測定した。この加熱装置は空気の流入を最少限にしているが、不完全な密閉であり、試験体の発火 (着火) を考慮し、Fig. 1 の K2 の熱電対で温度の変化を観測した。

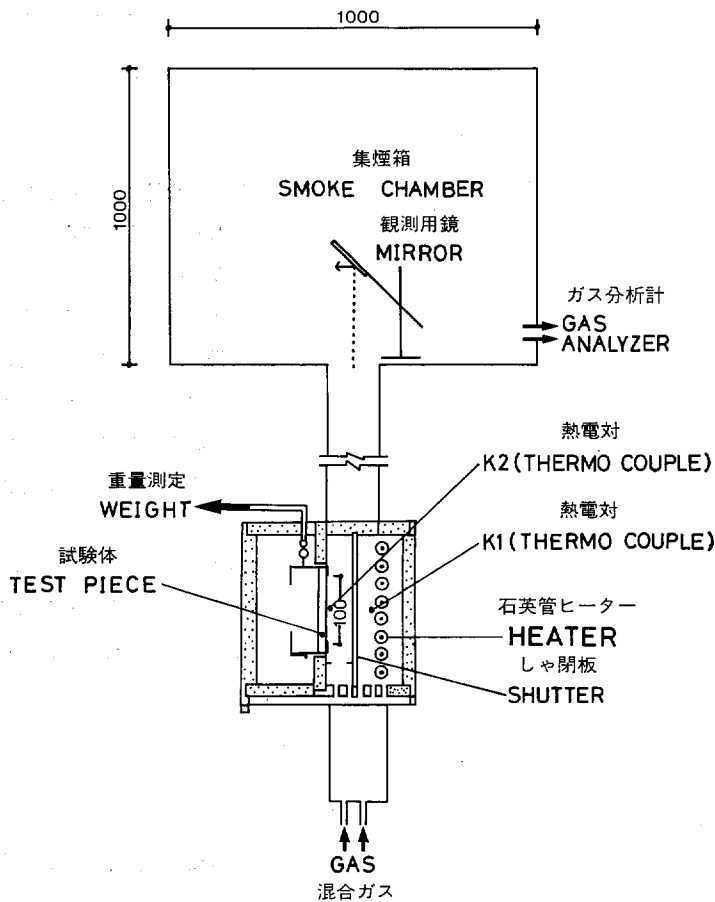


Fig. 1. 加熱装置 (単位ミリメートル)  
Radiation heater system (unit: mm)

### 2-3 炭化深さの測定

放射加熱をうけ炭化した合板の表面を、ワイヤブラシで削り取り、残った合板の厚さをダイヤルゲージ（小野測器モデル DG 144）で測定した。この場合ワイヤブラシで削り取られないで残った、黄褐色に変色した部分は炭化深さに算入しない。

### 2-4 ヒーター出力と熱エネルギー量

K 1 によって検出されたヒーターの設定温度と、その時に試験体表面に流入する熱エネルギー量の関係を Fig. 2 に示した。熱電対による温度制御のため、ヒーターは ON・OFF を繰り返し、熱エネルギー量も変動するが、ここでは平均値を用いた。

### 2-5 熱重量分析

熱分析用試料は、ヒーターの設定温度が 400 °C で 30 分間の加熱を受けた 18 ミリ厚の合板で、加熱面側から数えた構成単板の第 2, 4, 5, 6 層からナイフで薄切片をきりとり、No. 1~4 とした。熱重量分析には熱分析装置（真空理工社、TA-1500）を用いて、空気雰囲気中（流量 30 ml/min）、昇温速度 10 °C/min の条件下で、室温から 500 °C まで昇温させ、重量変化を測定した。

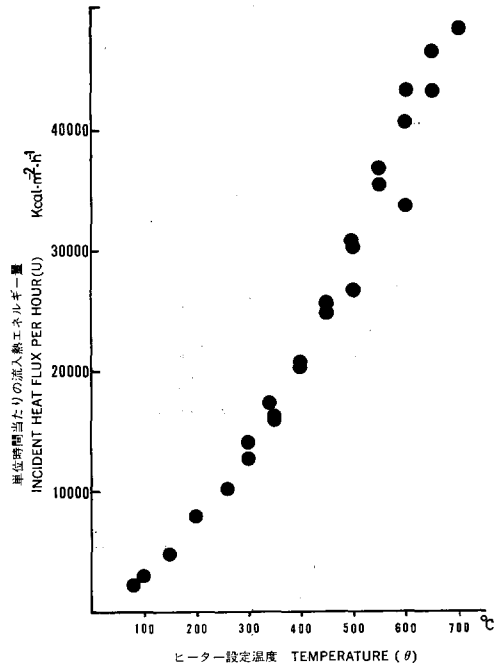


Fig. 2. ヒーター設定温度と単位時間当たりの流入熱エネルギー量

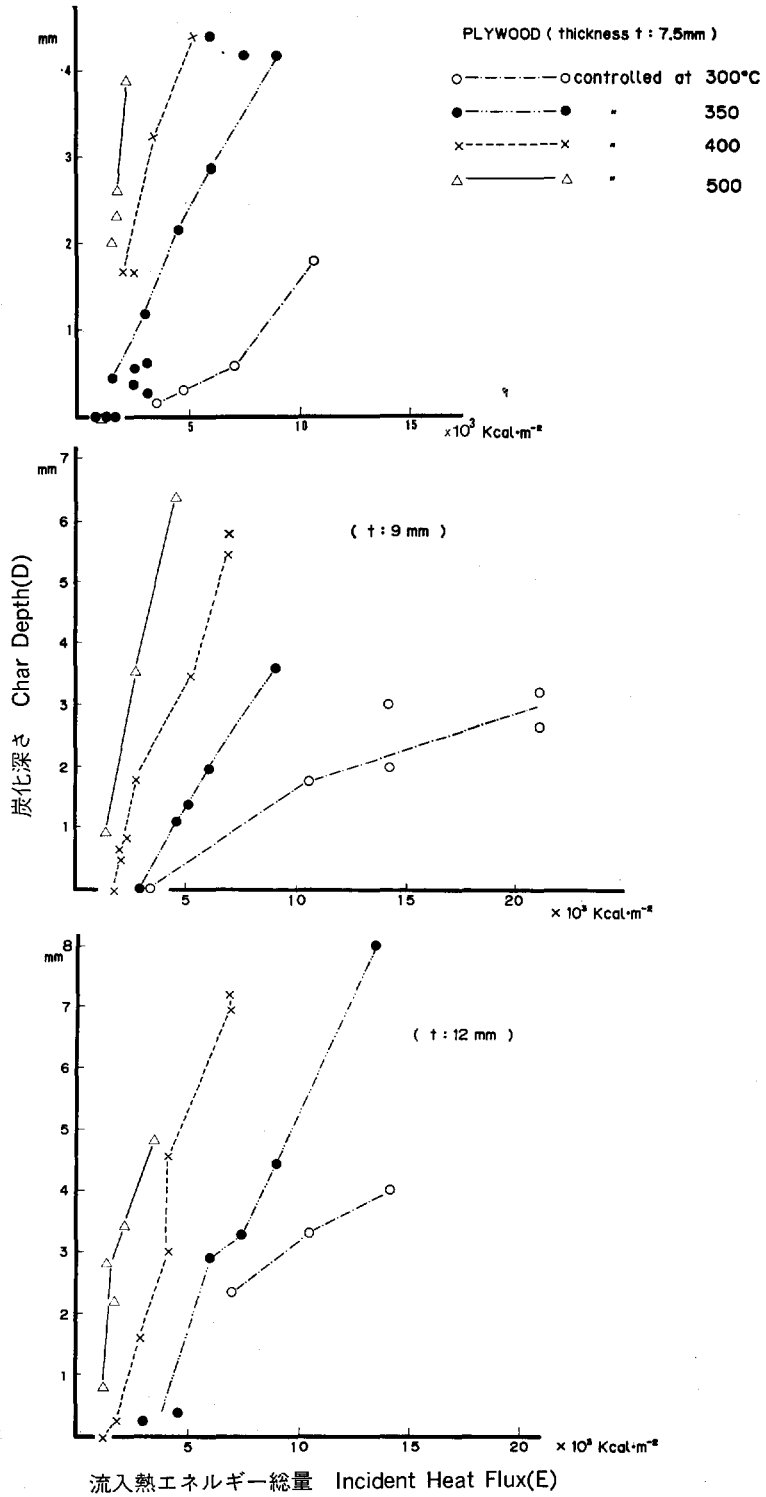
Incident heat flux per hour ( $U$ ) at a controlled temperature ( $\theta$ )

## 3. 結果と考察

合板の厚さ別に、炭化深さ ( $D$ :炭化層の厚さ) と合板表面に流入する熱エネルギー総量 ( $E$ ) の関係を Fig. 3-1~3-5 に示す。Y軸は  $D$ 、X軸は  $E$  で、この  $E$  の値は単位時間当たりに供給される熱エネルギー量 ( $U$ ) と加熱時間 ( $T$ ) の積 ( $[\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}] \times [\text{h}]$ ) である。

### 3-1 熱エネルギーと炭化深さ

図からは合板に流入する熱エネルギー総量 ( $E$ ) が大きくても、ヒーターの設定温度 ( $\theta$ ) が低温で、単位時間当たりの熱エネルギーの流入量 ( $U$ ) が少ないものは、単位時間当たりの流入量が大きい高温に比べて、炭化深さは小さくなることがわかる。またヒーターの設定温度が高いものは、熱エネルギーの総量が小さくても炭化深さは大きくなることがわかる。まず合板表面に炭化層が形成されるには、合板に流入する熱エネルギー量と合板から流出する熱エネルギー量（合板を透過する熱エネルギーや合板表面から反射される熱エネルギーなどの総量を指す）の差が合板の表面で熱分解を開始し、続いて炭化層を形成しうるだけの熱エネルギー量に一致するか、それ以上でなければならない。実際上では合板から流出する熱エネルギー量は、合板表面での熱分解や炭化層の形成によって熱伝導率や反射率などが変化するので、時間の経過とともに多少変化するであろう。しかし合板からの流出する熱エネルギー量を一定と考えるなら



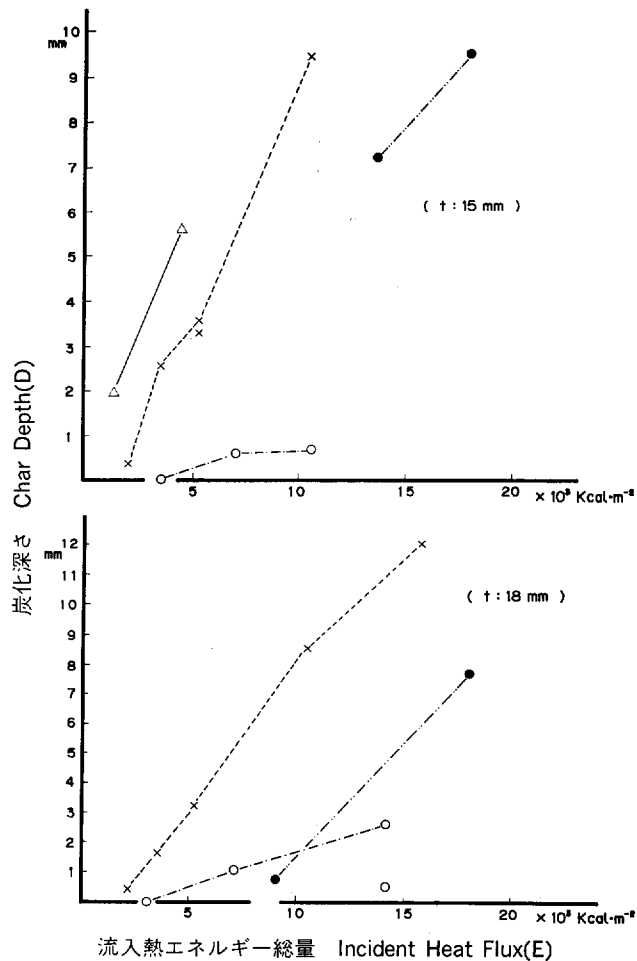


Fig. 3. 合板に流入する熱エネルギー総量と炭化深さ  
Char depth ( $D$ ) as a function of incident heat flux ( $E$ ) on plywood

ば、合板表面での熱分解・炭化に必要な熱エネルギー量の蓄積が速いほど、合板表面から内部に伝えられる熱エネルギー量は大きくなり、熱分解・炭化過程が促進され、炭化深さは大きくなるといえる。それゆえに単位時間当たりに流入する熱エネルギーが大きいほど、熱エネルギーの蓄積速度は速くなる。Fig. 3において、加熱温度が低い  $300^\circ\text{C}$  では、合板に流入する熱エネルギー総量は多いが炭化深さは浅い。逆に高温になると流入する熱エネルギー総量は少ないが炭化深さが深くなっているのは、前者は熱エネルギー量の蓄積速度が遅く、後者は速い理由による。

### 3-2 合板の厚さと炭化深さ

木材が加熱をうけると形成された炭化層が断熱層として作用し、炭化の進行を妨げ、炭化速度を低下させると考えられる。ここでは炭化層が断熱層として作用せず、熱エネルギーの供給によって炭化層が均一に形成されることを仮定して、合板の厚さと炭化深さを検討した。

ヒーター設定温度 ( $\theta$ ) を  $400^\circ\text{C}$  とし、単位時間当たりの熱エネルギー量を一定にした場合の合板の厚さと炭化深さの関係を Fig. 4 に示す。 $\theta$  が同じならば炭化深さ ( $D$ ) はある深さまでは合板の厚さに関係

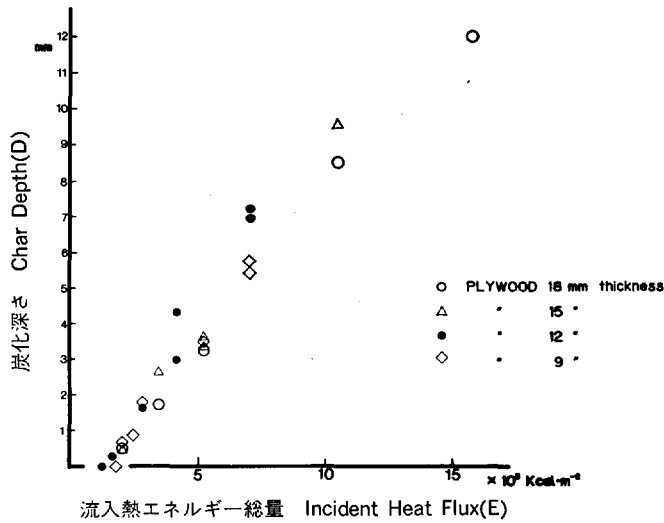


Fig. 4. 厚さ別合板のヒーター設定温度 400°C における炭化深さ Char depth (D) at 400°C controlled heater

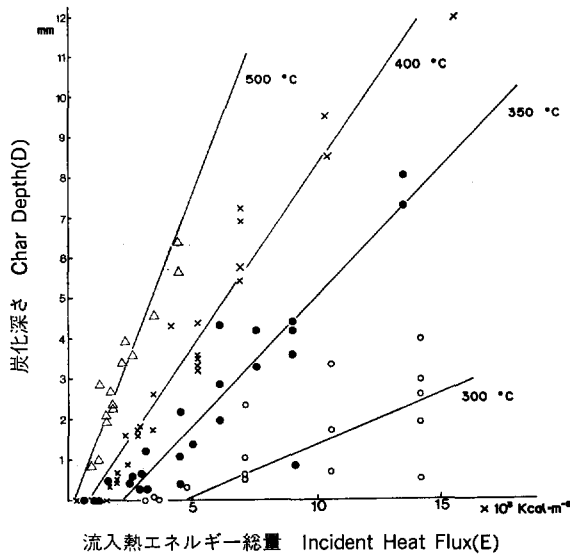


Fig. 5. 各ヒーター設定温度における流入熱エネルギー総量と炭化深さの関係  
 The relationship between incident heat flux and char depth at each controlled temperature

なく、合板に流入する熱エネルギー総量 (E) に比例し、直線的に増加する。

3-3 ヒーター設定温度と炭化深さ

ヒーター設定温度 (θ) ごとの流入熱エネルギー総量 (E) と炭化深さ (D) の関係を Fig. 5 に示す。  
 EをX軸, DをY軸にとると

$$D = a(E - e), \quad D \geq 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

の直線式で表される。この(1)式の勾配  $a$  は、単位流入熱エネルギー総量当たりの炭化深さを表し、設定温度が高くなるに従って、大きくなる。X軸の値  $E$  は単位時間当たりの熱エネルギー量 ( $U$ ) と加熱時間 ( $T$ ) の積であるから、炭化深さが同じ場合であってもヒーター設定温度が高い時、すなわち  $U$  が大きいときは、 $T$  が短くなることを示している。

### 3-3 炭化に必要な最少熱エネルギー量

(1)式の  $e$  の値は、おのおののヒーター設定温度 ( $\theta$ ) において、合板の表面で熱分解過程を経て炭化層を形成するために必要な最少限の熱エネルギー量である。前述のように合板の表面で炭化層が形成されるには、合板に流入する熱エネルギー量と流出する熱エネルギー量の差で、流入する量が多く、かつ炭化を開始するに十分な熱エネルギー量の蓄積が必要であり、 $D=0$  のときの  $E=e$  の値がそれを示す。またX軸の値  $E$  は単位時間当たりの熱エネルギー量 ( $U$ ) と加熱時間 ( $T$ ) の積であるから、 $D=0$  で、 $E=e$  のときの値を  $U$  で割るならば、おのおののヒーターの設定温度において合板の表面で炭化が始まるまでに必要な加熱時間 ( $T_s$ ) が明らかとなる。

Fig. 6 はFig. 5 における流入熱エネルギー総量 ( $E$ ) と炭化深さ ( $D$ ) の関係を、加熱時間 ( $T$ ) と炭化深さ ( $D$ ) の関係に書き改めたものである。この図の直線式

$$D=C(T-T_s) \quad \dots\dots\dots(2)$$

における勾配  $C$  は、おのおののヒーター設定温度 ( $\theta$ ) での炭化速度 (mm/min.) を表し、 $\theta$  によって決まる定数である。この  $C$  の値は設定温度が高くなるに従って大きくなる。また  $T_s$  はX軸の値で、合板表面で炭化が始まるまでの必要最少限の加熱時間で、 $\theta$  が定まれば  $T_s$  も定まる値である。これらのことから、ヒーターの設定温度 ( $\theta$ ) が低いならば、炭化速度 ( $C$ ) は遅くなり、炭化開始までの時間 ( $T_s$ ) は長くなる。また設定温度 ( $\theta$ ) が高いならば、炭化速度 ( $C$ ) は速く、炭化開始までの時間 ( $T_s$ ) は短か

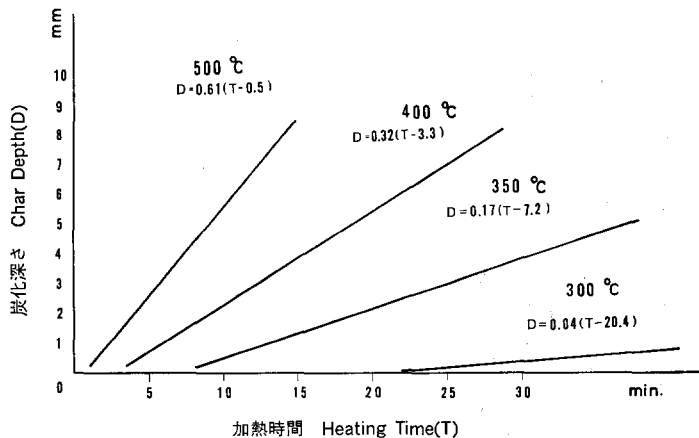


Fig. 6. ヒーター設定温度における加熱時間と炭化深さの関係

The relationship between heating time and char depth at each controlled temperature

Note: 図中の直線は  $D=C(T-T_s)$  で表される。D; 炭化深さ, C; 炭化速度, T; 加熱時間,  $T_s$ ; 加熱開始から合板表面で炭化がはじまるまでの加熱時間

linear lines were showed by  $D=C(T-T_s)$ , which D; char depth, C; charring rate, T; heating time,  $T_s$ ; duration to start charring from initial time

Table 1. ヒーター設定温度における流入熱エネルギー量と炭化深さ  
The relationship between incident heat flux (E)  
and char depth (D) at a controlled temperature

$\theta$ [°C]	$U$ [ $\times 10^8 \text{Kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ]	$e$ [ $\times 10^8 \text{Kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]	$C$ [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$T_s$ [min]	$r$
300	14,105	4,787	0,04	20,4	0,76
350	18,010	2,174	0,17	7,2	0,96
400	20,860	1,164	0,32	3,3	0,97
500	26,685	0,222	0,61	0,5	0,95

Abbreviations :

- $\theta$  ; controlled heater temperature ヒーター設定温度
- $U$  ; incident heat flux per hour 単位時間当たりの熱エネルギー量
- $e$  ; minimum incident heat flux to start charring on the surface of plywood at a controlled temperature  
ある設定温度において、合板表面で炭化が始まるために必要な最少総熱エネルギー量
- $C$  ; charring rate 炭化速度
- $T_s$  ; duration to start charring from initial time 加熱開始から合板表面で炭化がはじまるまでの加熱時間
- $r$  ; correlation coefficient of  $D = a(E - e)$  相関係数 (Fig. 5)

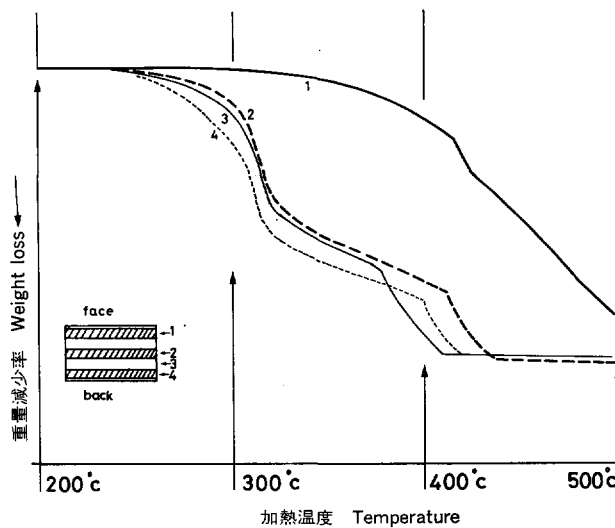


Fig. 7. 加熱をうけた合板各層の TGA 曲線

Thermogravimetric analysis between 300-500°C on each layer of plywood with temperature rising 10°C a minute in air flowing at 20 ml a minute

Legend :

plywood heated at 400°C for 30 minutes

- ① ————— char layer
- ② - - - - - coloured layer
- ③ ————— coloured layer
- ④ ..... uncoloured layer

くなることわかる。そして、 $C$ ,  $T_s$  は  $\theta$  によって決まる定数である。これらの値を Table 1 に示す。

3-4 炭化深さの決定

次に炭化深さの測定にあたって、炭化の定義をし、測定値のバラツキを少なくする必要がある。木材の



炭化の程度を表すとき、目視による方法が最も一般的であり、材面の変色を含めて「炭化」という場合が多い。ここでは変色した部分も含めて、熱重量分析を行い「炭化部分」の定義について検討した。Fig. 7は、ヒーターの設定温度が400℃で、30分間の加熱を受けた18ミリ厚7プライの合板から採取した試料(No. 1~4)の熱重量変化の図である。試料 No. 1 の重量変化は曲線1で、熱重量分析の雰囲気温度が上昇しても重量減少は緩やかで、他の曲線の変化とは異なっている。これは曲線1の試料がすでに炭化が十分進み、300℃前後で熱分解による重量減少を示す成分がすでに無いことを示している。曲線4はレッドラワンの熱重量分析の重量減少率が300℃で26%、350℃で66%、400℃で77%を示す結果<sup>1)</sup>とほぼ同じであり、放射加熱の熱的影響がなかった部分であるといえる。

曲線2の試料はワイヤーブラシで表面の炭化部分を除いて、残った黄褐色に変色した部分の熱重量変化である。300℃前後の重量減少変化が大きく、炭化が進んだ部分とはいえ、境界領域にある部分と考えることができる。曲線3の試料は曲線2の試料より下層にある部分で、加熱表面から離れることで、熱的影響はさらに少ないことを、重量減少曲線から判断できる。

以上の熱重量分析の結果から、炭化部分は200~400℃の範囲における熱重量変化がきわめて少ない部分であり、ワイヤーブラシで容易に除かれる部分であると定義することができる。また、黄褐色に変色した部分は炭化部分と区別し、炭化深さに算入しないことが妥当であることが明らかとなった。

## ま と め

合板への熱的影響の中で、放射による熱影響を、合板の表面からの炭化深さで検討した。合板に流入する熱エネルギー量と実火災における熱エネルギーの関係は十分に把握されていないが、本実験は基礎的なデータを蓄積するためのものである。得られた結果をまとめると次のとおりである。

空気の供給と流れが制限された加熱条件の下では、

(1) 合板の炭化深さはヒーターの設定温度が同じならば、ある深さまでは合板の厚さに無関係に、合板表面に流入する熱エネルギー量に比例する。

(2) ヒーターの設定温度が300~500℃範囲において、炭化速度は合板に流入する熱エネルギーの総量よりも、単位時間当たりに供給される熱エネルギー量に比例する。

(3) ヒーターの設定温度における炭化速度と炭化開始時間の関係で、ヒーターの設定温度が高くなると、炭化速度は速く、炭化開始時間は短くなり、設定温度が低いならば炭化速度は遅く、炭化開始時間は長くなった。

(4) 放射加熱を受けた合板の熱重量分析によると、炭化部分の熱重量減少率は400℃までゆるやかで約25%であるが、黄褐色に変色した部分の重量減少率は、加熱を受けていないレッドラワンのそれと類似して、400℃までに70%の重量減少が起こっていることがわかった。このことから変色した部分は炭化した部分と区別して、炭化深さに算入しないことが適切であるといえる。

今後の課題として本実験から求められた値の精度を一層向上させるための実験と熱エネルギー収支の検討を行う。

引用文献

- 1) 熊谷八百三, 大内丈夫, 小野昌孝: 木材誌. 19, 265 (1973)

---

**Charring of Plywood by Radiation Heater**

Saburou UESUGI<sup>(1)</sup>

Summary

Heat energy is transferred by three systems ; convection, conduction and radiation. In real fire, the boards in the construction are fully exposed to the fire and highly susceptible to radiation in general.

In this study, plywood was heated by a simplified radiation system, consisting of eight quartz tubes enclosed in an electric wire heater. (Fig. 1)

The harm level of plywood by radiation was measured with the char depth defined as the distance from the original surface on condition of limited air supply and flow.

The results were summarized as followed ;

- (1) The char depth of plywood was increased linearly by the total incident heat flux, irrespective of its thickness at the same heater temperature.
- (2) As the controlled heater temperature (not plywood surface temperature) increases within the range of 300—500°C, the char depth was increasingly affected by the incident heat flux per hour (the strength of heat flux) against the total incident heat flux.
- (3) The charring rate and the duration to start charring on the surface of plywood were decided at each controlled temperature. (Table 1)
- (4) By the thermogravimetric analysis (TGA), the coloured layer, seen as brown, does not coincide with the real burnt char layer, and is not charring depth. The coloured layer was the boundary layer which showed the same TGA curve as the unheated wood.

---

Received July 2, 1986

(1) Wood Utilization Division