

# 輻射加熱された木材の内部温度変化

菊地 伸一 駒澤 克己

## Internal Temperature Change of Wood by Radiation Heating

Shin'ichi KIKUCHI

Katsumi KOMAZAWA

In this study, laminated timber of ponderosa pine, spruce and yellow poplar was heated by a simplified radiation heating system, consisting of fibrothal module heater to determine the charring rate and the charring temperature.

The charring rate of laminated timber at 1.75kW heater output was about 0.6mm/min, and that at 2.0kW heater output was about 0.95mm/min. The temperature at the char-wood interface was approximately 247~260°C. The internal temperature was increased linearly by the distance from the char-wood interface.

*Keywords*: radiation heating, charring rate, charring temperature

輻射加熱, 炭化速度, 炭化温度

ボンデローサパイン, スプルース, イエローポプラの集成材を輻射加熱し, 炭化速度および炭化温度について検討した。

ヒーター出力1.75kWで加熱したときの炭化速度は約0.6mm/min, ヒーター出力2.0kWで加熱したときの炭化速度は約0.95mm/minであった。炭化境界面の温度は247~260°Cの範囲にあった。炭化境界面からの距離と内部温度とは直線関係を示した。

### 1. はじめに

1990年6月, 防火戸の試験方法および評価方法についての建設省告示が改正され, 木材のような可燃性材料であっても防火戸の部材として使用できるようになった。ドアや窓が火災時に求められる性能は, 火炎や煙, 燃焼熱を一定時間出火室に閉じ込めておくことである。また, 1993年には準耐火建築物や3階建て共同住宅も木造とすることが可能になったが, これらの建築物に用いる構造部材にも遮熱性や遮炎性が求められる。

木材の場合, 表面燃焼後に生じる炭化層が内部の燃焼を妨げ, 裏面への熱伝導を低下させる断熱材として作用することが知られている。このような木材の燃焼に伴う炭化現象は, 耐火試験の標準加熱条件については詳細に検討されている<sup>1~5)</sup>。しかし, 実火災では接炎しない状態での輻射による加熱も生じている。このような標準加熱条件以外の加熱による木材の炭化や, 内部の温度変化については明らかではない。

また, 大断面集成材を用いた建築物の火災安全性は, 一定時間加熱された後に残る未炭化断面が構造耐力を

保持することによって確保される。これが、建築基準法に燃えしろ設計として取り入れられている。この場合、未炭化断面の強度には変化がないものとして計算されているが、実際には200 以下の低い温度範囲でも、強度低下の起こることが報告されている<sup>6-8)</sup>。このため、ある加熱を受けた木材の内部温度分布を知ることが正確な強度予測のために重要となる。

そこで、一定強度の輻射で加熱された木材の内部温度および炭化温度について明らかにするため、試作した加熱炉による予備的な検討を行った。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試体

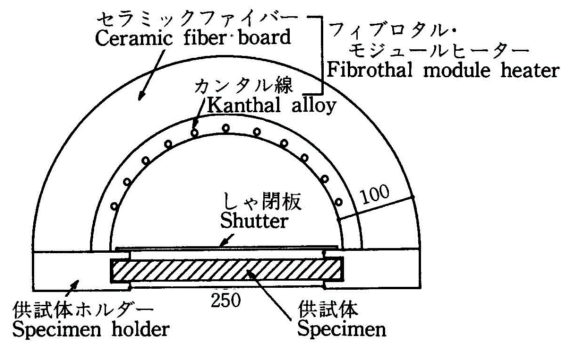
供試体には、スプルース(Picea spp.)、イエローポプラ(Liriodendron tulipifera L.)およびポンドローサパイン(Pinus ponderosa Laws.)の幅10~30mmの小角材を接着集成した板材を用いた。供試体寸法は厚さ30mm、幅300mm、長さ300mmとし、23℃、50%R.H.で1か月以上養生した。試験時の含水率は9~10%、集成材の比重はスプルースが0.38~0.40、イエローポプラおよびポンドローサパインは0.46~0.50程度で

あった。

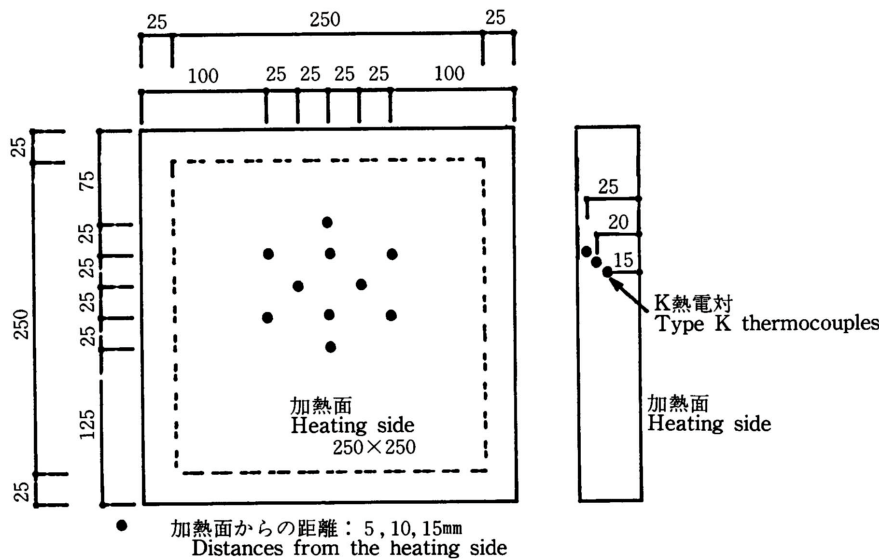
### 2.2 加熱方法

供試体の加熱には、カンタル・ガ德里ウス(株)製のハーフシリンダー型フィブロタルモジュールヒーターを用いた。このヒーターは、鉄、アルミニウム、クロムの合金であるカンタル発熱体をセラミックファイバー中に埋め込み一体化することで、加熱面からの輻射が均一になるように設計されたヒーターである。

第1図に示すように、供試体とフィブロタルモジュールヒーターの間にはしゃ閉板を設け、ヒーターの出力が安定してからしゃ閉板を開けて供試体に



第1図 加熱装置  
Fig.1. View of transverse section of radiation heater system.



第2図 熱電対取り付け位置  
Fig.2. Location of thermocouples in the specimens.

対する加熱を開始した。供試体はヒーターに付加した供試体ホルダーで垂直に保持し、加熱面は250×250mmとした。

供試体に対する加熱の強さは、ヒーター出力を1.75kWおよび2.0kWの2水準とした。このとき、供試体取付位置に配置した繊維混入けい酸カルシウム板（不燃第1061号）の表面温度は、ヒーター出力が1.75kWでは410±30、2.0kWでは515±20程度となった。

### 2.3 温度および炭化深さ測定

供試体の内部温度は、素線径0.65mmのガラス被覆K熱電対を非加熱面側から挿入して測定した。熱電対の供試体内部への埋め込み深さは加熱面から15、20、25mmとした。熱電対の取り付け位置は第2図に示す10か所で、合計30点とした。

供試体の加熱時間は、加熱面から深さ20mmの位置にある熱電対が250~300を示すまでとし、ヒーター出力1.75kWの加熱では35分程度、ヒーター出力2.0kWの加熱では20分程度であった。

所定の温度に到達後、供試体はすみやかに加熱装置から取り外し、水中に浸漬させて燃焼を止めた。供試体を乾燥・調湿後、加熱を受けて炭化した部分はワイ

ヤブラシによって削り取った。残された未炭化層の厚さを10か所の温度測定位置付近で測定し、加熱前の供試体厚さとの差から炭化深さを求めた。

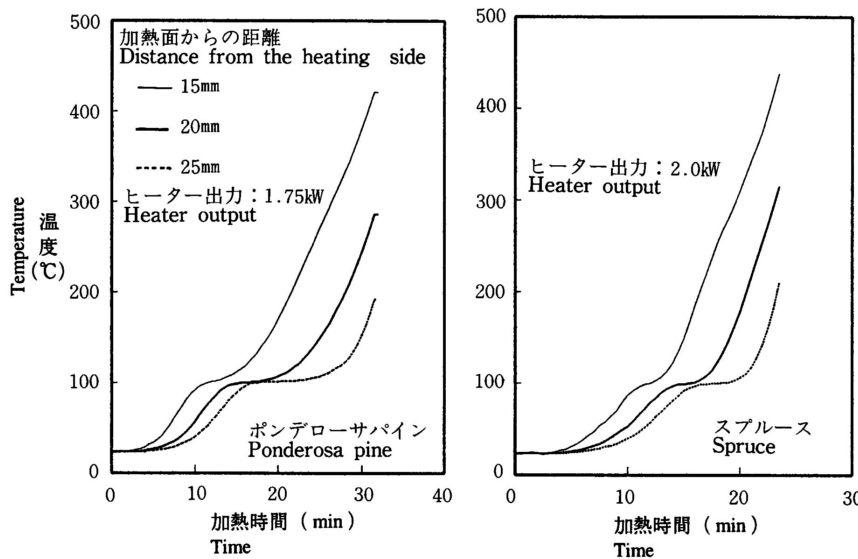
加熱試験は、各樹種について2水準の加熱強度で、各2回行った。

## 3. 結果

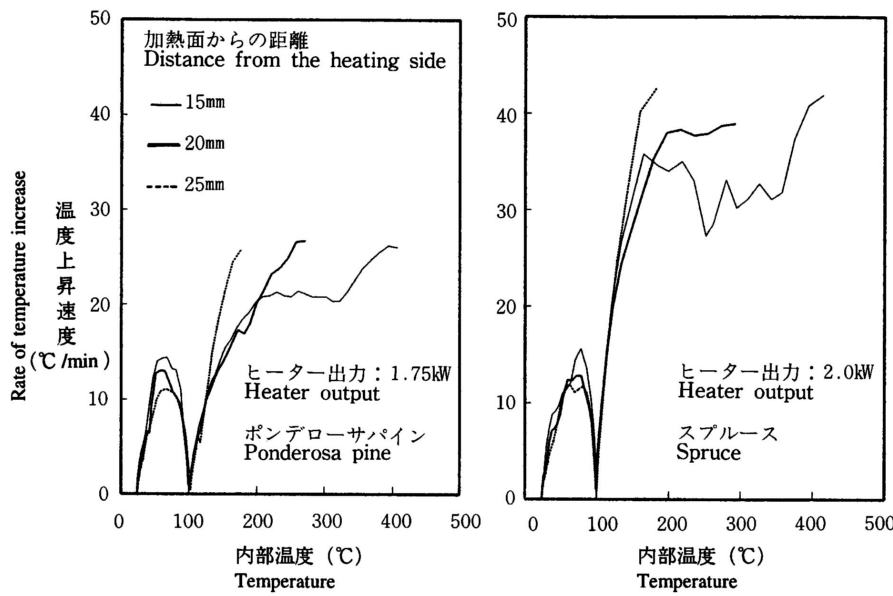
### 3.1 内部温度の経時変化

一定強度の輻射加熱を受けた供試体内部の温度変化の1例を第3図に示した。加熱時間の経過と共に内部温度は上昇するが、その変化は一様ではなく100前後で温度上昇は一時停滞する。この100前後で起こる温度上昇の停滞は、供試体に含まれる水分の気化・蒸発の影響と考えられる。また、加熱面から離れるほど100前後の停滞時間が長くなる傾向を示した。

第3図を時間で微分すると、加熱時間と温度上昇速度との関係が得られる。ついで、横軸に加熱時間かわりに内部温度をとって整理すると、内部温度とその温度における温度上昇速度との関係は第4図のようになる。これによると、一定強度の輻射加熱を受けた木材の温度上昇速度は、樹種、加熱強度および加熱面か



第3図 輻射加熱を受けた木材の内部温度変化  
Fig.3. Relation between heating time and the internal temperature of ponderosa pine specimen at 1.75kW heater output and spruce specimen at 2.0kW heater output.



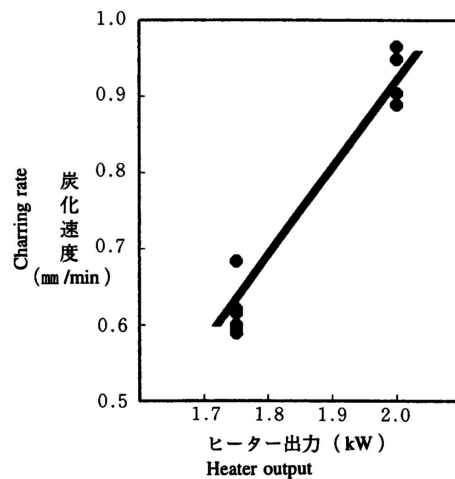
第4図 内部温度と温度上昇速度

Fig.4. Relation between the internal temperature and the rate of temperature increase of ponderosa pine specimen at 1.75kW heater output and spruce specimen at 2.0kW heater output.

らの距離にかかわらず同じような傾向を示した。すなわち、60~80 に1次ピークがあり、100 前後で温度上昇速度はほぼ0となる。次いで、直線的に温度上昇速度が大きくなり、おおよそ200 以降は一定となる傾向が見られた。また、加熱強度の違いが200 以降の温度上昇速度に影響を与え、ヒーター出力1.75kWの加熱では20~25 /min、ヒーター出力2.0kWの加熱では30~40 /min、の温度上昇速度を示した。2.0kW加熱は1.75kW加熱の約1.5倍の温度上昇速度であるが、この差は次に示す炭化速度の差にほぼ対応してあらわれている。

### 3.2 炭化速度

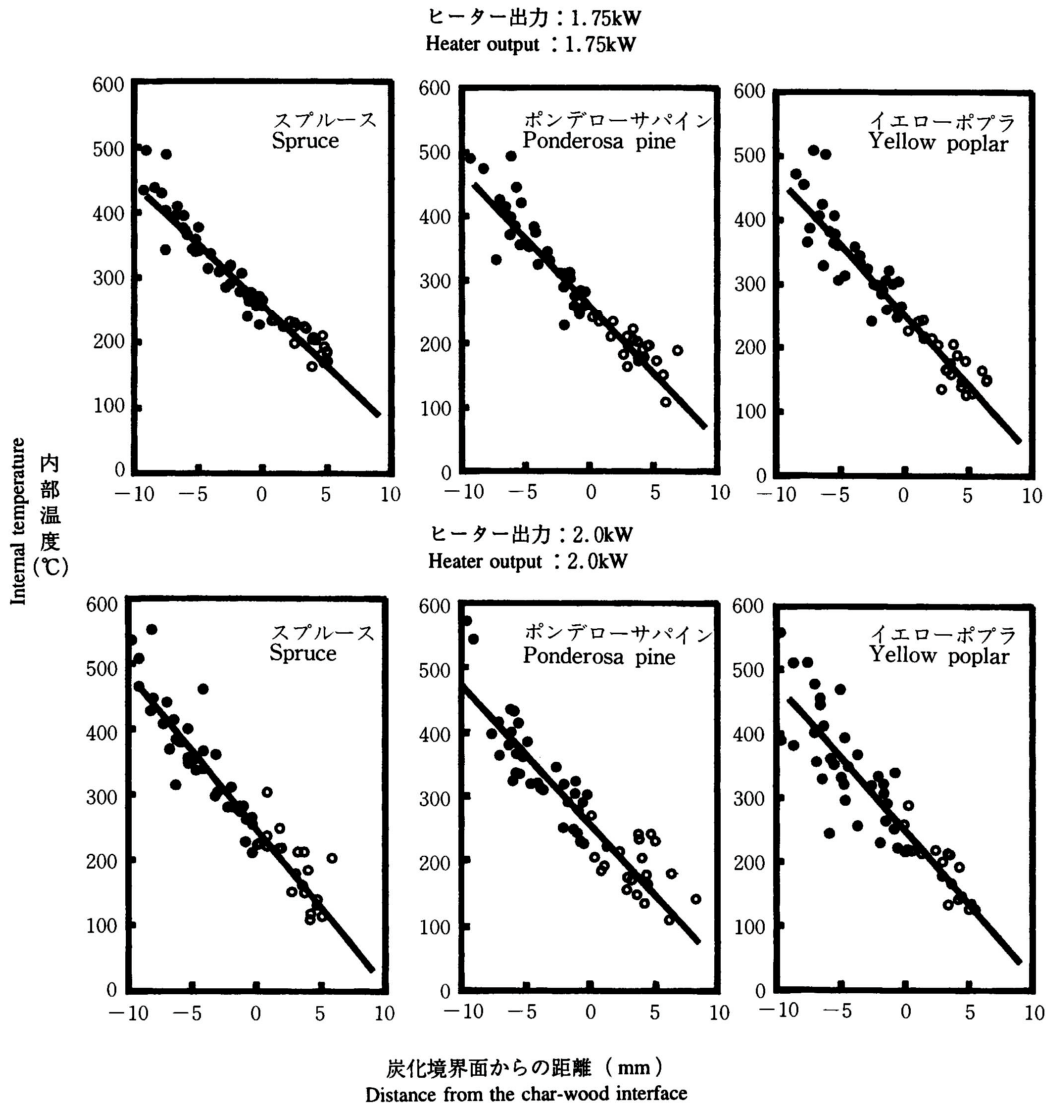
炭化層付近は、炭化層、熱分解領域、健全部に分けられるとされている<sup>9)</sup>。今回、ワイヤブラシで容易に削り取れる部分を炭化層とし、黄褐色に変色しているだけの部分は未炭化層に含めた。これは、黄褐色に変色した部分の熱重量変化は加熱を受けていない木材に近い<sup>10)</sup>、とされていることによる。



第5図 ヒーター出力と炭化速度

Fig.5. Effects of heater output on the charring rate of specimens.

このようにして求めた炭化深さと供試体加熱時間とから計算される炭化速度を第5図に示した。ヒーター出力1.75kWで加熱したときの炭化速度は0.59~0.64



第6図 炭化境界面からの距離と内部温度  
Fig.6. Relation between the distance from the char-wood interface and the internal temperature.  
Legend : ● ; 炭化層の温度 Temperature of char layer      ○ ; 未炭化層の温度 Temperature of normal wood

mm/min, 2.0kWで加熱したときの炭化速度は0.90~0.97mm/minであった。

板材や集成パネルをASTM E 119やJIS A 1304の標準耐火加熱曲線に沿って加熱したときの炭化速度は、厚さ75mm, 比重0.4のダグラスファーおよびサウザンパインで0.7~0.8mm/min<sup>9)</sup>, 厚さ12~40mm, 比重0.44のスギ, ヒノキ板材で0.6~0.7mm/min<sup>11)</sup>, 厚さ100mm

のスギ, ヒノキ, カラマツで0.7~0.9mm<sup>12)</sup>と報告されている。

また, 大断面集成材を標準耐火加熱曲線に沿って加熱したときの炭化速度は0.6~0.8mm/minと報告されている<sup>3,13~15)</sup>。これらのことから, 本装置によるヒーター出力1.75~2.0kWでの加熱は, 火災の標準耐火加熱にほぼ相当するものといえる。

炭化速度は比重の影響を受け、比重が大きくなるほど炭化速度が小さくなることが知られている<sup>16,17)</sup>。しかし、今回試験した供試体の比重範囲では、明瞭な差は認められなかった。

3.3 炭化位置と内部温度

加熱終了時における炭化境界面と各熱電対までの距離を計算し、熱電対が加熱終了時に示した温度との関係を、樹種および加熱強度別に第6図に示した。ここで、炭化境界面と炭化層に入っている熱電対までの距離はマイナス、炭化境界面と未炭化層にある熱電対までの距離はプラスとした。第6図によると、100 から400 の範囲では、炭化境界面からの距離と内部温度とはほぼ直線関係を示した。そこで、炭化境界面から熱電対までの距離とその熱電対が加熱終了時に示した温度についての回帰分析を行い、その結果を第1表に示した。これによると、樹種および加熱強度にかかわらず、炭化境界面からの距離と温度との相関は高く、い

ずれも危険率1%で有意であった。なお、炭化層の温度は部分的に回帰直線より顕著に高くなることがあった。これは熱電対取付部付近に亀裂を生じ、熱電対が露出したためであると考えられる。

加熱を受けた木材の炭化速度を求めるには、加熱終了後の残存断面から計算する方法と、測定された内部温度が炭化温度に到達するまでの時間から推定する方法とがある。温度測定による炭化速度の推定法では、基準となる炭化温度を定める必要がある。これまで、炭化温度には木材の着火危険温度である260<sup>12)</sup>、セルロースの分解が始まる288<sup>9,18,19)</sup>、300<sup>17)</sup>などが用いられてきた。木材は構成成分であるヘミセルロース、セルロース、リグニンで熱分解挙動が異なり<sup>20)</sup>、炭化開始温度もヘミセルロース、セルロース、リグニンの順に高くなる。このため、熱分解のどの段階に着目するかによって、炭化温度の推定値が異なることになる。

第1表 炭化速度および炭化面からの距離と内部温度の関係

Table 1. Charring rate under different heater output and relation between the distance from the char-wood interface and the internal temperature.

加熱強度 Heater output (kW)	樹種 Species	比重 Specific gravity	炭化速度 Charring rate (mm/min)	回帰式 <sup>1)</sup> Linear regression equation	相関係数 <sup>2)</sup> Correlation coefficient
1.75	ボンデローサパイン Ponderosa pine	0.48	0.64	$T = -21.1d + 259.8$	0.95**
	スプルース Spruce	0.40	0.61	$T = -18.6d + 257.1$	0.96**
	イエローポプラ Yellow poplar	0.50	0.59	$T = -21.8d + 251.2$	0.94**
2.0	ボンデローサパイン Ponderosa pine	0.46	0.90	$T = -21.5d + 257.7$	0.91**
	スプルース Spruce	0.38	0.95	$T = -23.9d + 246.5$	0.95**
	イエローポプラ Yellow poplar	0.49	0.97	$T = -22.8d + 249.1$	0.84**

1): T ; 内部温度 (°C)

2): \*\* ; 危険率 1% で有意

d ; 炭化面からの距離 (mm)

1): T ; Internal temperature (°C)

2): \*\* ; Significant at the 1% level

d ; Distance from the char-wood interface



第1表に示した回帰式のy切片は、炭化層と未炭化層の境界温度つまり木材の炭化温度を意味する。今回の試験から推定される炭化温度は、247~260°Cの範囲にある。また、山田ら<sup>21)</sup>はスギ、ベイツガ等の耐火加熱試験から、炭化位置の温度は240~250°Cであるとしている。これらから、炭化温度が288~300°Cであるとして推定した炭化速度は、実際の炭化速度よりも小さな評価をすることになる。こうして求められた炭化速度や炭化温度をもとに防火ドアの遮炎性や木製骨組み部材の耐力低下を評価すると、ドアや木質部材の性能を過大評価することになり防火安全上好ましくない。今回、試作した加熱炉による輻射加熱試験の結果、炭化速度等の評価を行うには炭化温度を250°C前後とするのが適切であると判断された。

#### 4. まとめ

- 1) 一定強度の輻射加熱を受けた供試体内部の温度上昇速度は60~80°Cに1次ピークを示し、100°C前後でほぼ0となる。次いで、直線的に温度上昇速度が大きくなり、おおよそ200°C以降は一定となる傾向にあった。
- 2) ヒーター出力1.75kWで加熱したときの炭化速度は0.59~0.64mm/min、2.0kWで加熱したときの炭化速度は0.9~0.97mm/minであった。
- 3) 炭化境界面からの距離と内部温度とは直線関係を示し、炭化境界面の温度は247~260°Cの範囲にあった。

#### 文 献

- 1) E. L. Schaffer : Forest Products Lab., FPL0145 (1966) .
- 2) Robert H. White : The SFPE handbook of fire protection engineering, National Protection Association, 1988, 3-130-3-142.
- 3) K. Tenning : Brandskydd, 42(4), 50-54 (1961) .
- 4) H. Dorn, K. Egner : Holz als Roh-und Werkstoff, 308-320 (1967) .
- 5) J. Noren : International Conference on Timber

- Engineering, Seattle, USA, 1988, 19-22.
- 6) 川村二郎 : 木材学会誌, 35, 447-454 (1989) .
- 7) 上杉三郎 : 同上, 38, 985-994 (1992) .
- 8) 中村賢一 ほか3名 : 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987, 787-788.
- 9) E. L. Schaffer : Forest Products Lab., FPL69 (1967) .
- 10) 上杉三郎 : 林業試験場研究報告第340号, 187-196 (1986) .
- 11) 山田誠 : 第17回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集, 1987, 7-12.
- 12) 石原茂久, 東丸敬三, 東丸真一 : 木材研究資料第18号, 146-161 (1983) .
- 13) 上杉三郎 : 木材学会誌, 40, 424-428 (1994) .
- 14) 最上滋二 ほか4名 : 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983, 2789-2790.
- 15) 中村賢一 ほか4名 : 同上, 1984, 2877-2878.
- 16) B. J. Noren, B. A. -L. östman : Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium, USA, October 7-11, 1985, 325-335.
- 17) R. M. Nussbaum : Journal of FIRE SCIENCES, 6, 290-307 (1988) .
- 18) E. L. Schaffer : Forest Products Lab., FPL450 (1984) .
- 19) Forest Products Laboratory, Wood Handbook : Wood as an Engineering Material, 1987, p.15-4, 1987.
- 20) F. C. Beall, H. W. Eickner : Forest Products Lab., FPL130 (1970) .
- 21) 山田誠 ほか4名 : 昭和63年度日本火災学会研究発表概要集, 1988, 71-72.

—性能部 耐久性能科—  
(原稿受理 H7. 7. 12)