

伝統木造建築の類焼防止を目的とした防火塗料の性能評価

村岡 宏 小宮 英孝

Evaluation of Fire Retardant Paints for Traditional Wooden Buildings

Ko Muraoka Hidetaka Komiya

Abstract

Cone calorimeter tests (ISO 5660-1) were conducted on fire retardant paints for wooden materials and ignitability and combustibility was compared. Except for intumescent paints, values of critical heat fluxes for ignition were 1.2~1.5 times higher than for unpainted specimens. The values for intumescent paints could not be deduced due to lack of data. However, they are assumed to have the highest performance in preventing ignition and suppressing combustion. From the case study based on heat flux calculations, it is clear that these paints are useful for protecting traditional wooden buildings against spread of fire.

概要

本報告では現在市販されている数種類の木材用防火塗料に対して、ISO5660-1で標準化されているコーンカロリーメーター法による燃焼試験を行い、各種防火塗料の着火性、燃焼性を評価することで、これらの防火塗料が伝統木造建築の類焼防止性能にどれだけ寄与できるのかについて定量的な検討を行った。検討の結果、発泡系以外の防火塗料では無塗布と比較して着火限界放射強度が1.2~1.5倍大きくなった。発泡系塗料は着火限界放射強度について他の塗料との直接比較はできなかったが、着火防止・燃焼抑制の効果は最も高いと考えられる。得られたデータを用いて放射熱計算によるケーススタディを行った結果、相隣関係の条件や他の類焼防止対策と組み合わせて用いることにより、伝統木造建築においても防火塗料が類焼防止に有効であることが判明した。

1. はじめに

木材を難燃化する手法には、木材全体に難燃薬剤を浸透させる方法と、木材表面に防火塗料を塗る方法とがある。前者は難燃薬剤の効果が木材全体に行き渡るため、確実に難燃効果を上げることができる反面、薬剤を浸透させるために大掛かりな設備が必要であったり、時間やコストがかかること、また、部材の段階で処理しなければならないので、既存の建築物に処理を施すことができない等の問題があった。これに対して、後者の防火塗料は現場で容易に塗布できることから、既存の建築物に難燃処理を施すことも可能であり、最近では、木造の文化財建築物の防火性能向上にも使用されている。しかし、これらの市販の木材用防火塗料は統一された尺度での防火性能評価が行われていないため、果たして防火性能の向上にどれ程の効果があるのか不明な点も多かった。

本報告では現在市販されている数種類の木材用防火塗料に対して、ISO5660-1で標準化されているコーンカロリーメーター法による燃焼試験を行い、各種防火塗料の

着火性、燃焼性を評価することで、これら木材用防火塗料が伝統木造建築の類焼防止にどれだけ寄与できるのかについての定量的な検討を行った。

2. 木材の難燃化手法とその問題点

木材の難燃化手法には難燃処理の目的により、薬剤処理（注入、浸漬、塗布）、不燃材料による積層（鋼板・アルミ板等）、防火塗料の3つに大別される。

このうち伝統木造建築に使用される無垢材に対して適用可能なのは薬剤処理と防火塗料である。の薬剤処理はこれまで一般的に行われている方法であり、木材自体の難燃性を向上する効果は確実に期待できる。この薬剤の難燃化機構は以下の3つに大きく分類できる¹⁾。

1) 脱水炭化作用...木材は熱分解により炭素と水が生成されるが、生成された炭素は燃えにくいことから、薬剤により脱水反応 (H_2O の生成) を促進させる方法。主な薬剤としてリン酸アンモニウム、硫酸アンモニウムがある。

2) 気相燃焼制御作用...セルロース等の分解により生成された可燃ガス相に、ハロゲン等の不活性ガスを薬剤から発生させて可燃性ガス成分の希釈、連鎖成長反応の抑制を行うもの。塩素、臭素の化合物が用いられる。

3) 構造の安定化...ホウ素化合物、アンチモン化合物等により木材の分子構造が架橋化され安定性が増す。

上記に示したような、薬剤を注入することで木質系の材料でも建築基準法で規定された準不燃材料までは認定を取得することが可能となる。ただし、準不燃の認定を取得したものの多くは木片セメント板や木毛セメント板等のセメントとの混和材料であり、木材単独で構成された製品(合板、製材等)の数は少ない。認定された木質系材料に使用される薬剤の多くはリン酸アンモニウムを主剤とするものであり、難燃合板では1m³当たり60kg以上、準不燃材料で木材1m³当たり100~300kgの薬剤が必要である²⁾。

一方、薬剤処理の効果を高めるためには注入量と共に部材内部全体に薬剤を注入する必要があるが、その主な手法として加圧注入法がある。加圧注入(浸透)法は種々の圧力レベルに調整された密閉鋼製タンク内で浸透させられる。負圧と正圧を交互に変化させる方法によって、得られる難燃効果に差が生じるが、大掛かりな設備と経費が必要なのは言うまでもない³⁾。例えば、減圧4時間(2.7×10⁵Pa, 30)、常圧注入8時間、加圧注入12時間(最大圧力2.9×10⁶Pa, 40)の処理工程をスギ材に適用する場合には、乾燥までを含む加工費用だけで1m³当たり約75万円が必要であると言われている⁴⁾。また、薬剤注入法は組み立てる前に部材単位で注入処理をしなければならないので、既存の伝統木造建築に対して難燃処理を施すことができない等の問題がある。

3. 実験概要

3.1 試験体

今回、日本で市販されている5種類の防火塗料(輸入品を含む)を選択し、それぞれと塗布量を変化させてTable 1に示す13種類の試験体を作成した。Bシリーズ、およびEシリーズは脱水作用による炭化層生成を促進する難燃手法を用いた塗料であり、Bシリーズはリン・チッソ系の化合物、Eシリーズは無機リン酸塩および硫酸アンモニウムをその主成分としている。Cシリーズは表面に無機系の被膜を作って酸素の供給を遮断する機構の塗料であり、無機系化合物とバインダーからなる塗料である。DシリーズおよびFシリーズは発泡系の塗料であり、Dシリーズは尿素系の化合物が主成分である。Fシリーズは成分の詳細が不明であった。

試験体塗布後の状況をPhoto 1に示す。A1は無塗布の試験体、B1とE1は炭化促進系塗料の塗料である。炭化促進系の塗料は塗っても木材の風合いはほとんど損なわれない。C1は表面被膜系の塗料である。この塗料は写真ではわかりにくいですが、塗布後の風合いは若干塗布前と

異なる。D1は発泡系の塗料であるが、この塗料は塗った後、写真でも明らかにわかるようにニスを塗った様になり、木材の風合いが著しく変化する。

防火塗料を塗布する基材は試験体間で比重等において、なるべくばらつきを少なくしたいという配慮からベイツガを使用した。試験体のサイズは100mm×100mm×20mmとし、塗布面は柃目で、平滑仕上げとした。試験体は塗料を塗布する前に、温度20、湿度50%で2ヶ月間養生し、塗布した後も同条件で2ヶ月間養生した。試験体の基材の含水率は平均9.4%であった。製作した基材の平均重量は93.9g(比重量469.5g/m³)、標準偏差5.9gで、このうち区間の最大・最小値からそれぞれ10%の基材は試験には用いなかった。

3.2 実験条件

上記基材の表面に試験体を塗り、塗布面を上にして水平に置き、上部から20,25,30,35,50kW/m²の5種類の加熱強度で試験を行った。同じ加熱条件でそれぞれ2回試験を行った(A実験は3回実施)。加熱面以外への加熱の影響を防ぐため、塗布面以外はアルミホイルでカバーした。なお、試験は試験体が燃え尽きるまで行うが、20分間加熱を継続しても着火に至らない場合はその時点で試験終了とした。

Table 1 燃焼試験体一覧
Outline of Specimens

防火塗料の種類	塗布量	試験体記号
無塗布(ブランク)	—	A
炭化促進系B	100g/m ²	B1
	200g/m ²	B2
	300g/m ²	B3
表面被膜系C	200g/m ²	C1
	400g/m ²	C2
発泡系D	918g/m ² (2回塗り)	D1
	700g/m ² (1回塗り)	D2
炭化促進系E	142g/m ² (2回塗り)	E1
	98g/m ² (1回塗り)	E2
発泡系F	400g/m ²	F1
	800g/m ²	F2
表面被膜C+炭化促進	C200g/m ² +B200g/m ²	G1

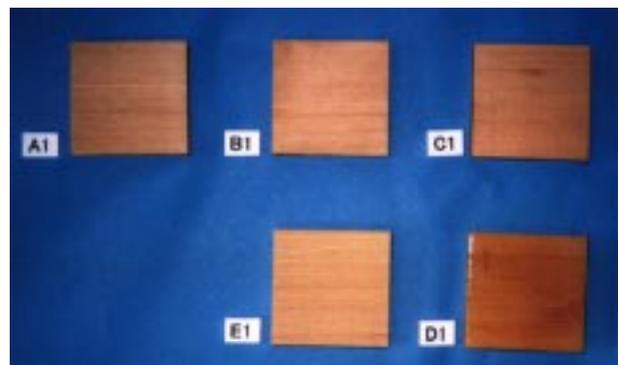


Photo.1 塗布後の試験体外観
Overview of Painted Specimens

4. 実験結果および考察

4.1 着火時間と着火限界放射強度

Table 2 に各実験条件における着火時間の平均値を示す。発泡系塗料については35kW/m²あるいは30kW/m²以下の加熱強度で着火に至らなかった。ただし、発泡系塗料のデータはすべて電気スパークによる着火装置を途中からはずして試験を行った。

Fig. 1は発泡系塗料を除く試験体において、縦軸に着火時間 t_{ig} (sec)、横軸に加熱強度 q (kW/m²)をとって整理したものである。厚さが10mm以上の材料に関しては、 $1/\sqrt{t_{ig}}$ と q は線形関係にあるとされており⁵⁾、これより材料が着火しない限界の放射強度を推定することが可能である。これらの関係より各試験体における着火限界放射強度を漸近解析により導出して、比較したものがFig.2である。ブランクの着火限界放射強度は9.9kW/m²となり、過去の実験的研究⁶⁾から導かれている木材の着火

限界放射強度10kW/m²とよく一致した。防火塗料を塗布したものは無塗布と比較して2.2%~5.6%値が増加している

Table 2 各実験条件における着火時間の平均値
Mean Ignition Times of each condition

記号	加熱強度(kW/m ²)				
	20	25	30	35	50
A	505.0	91.9	57.6	42.8	17.6
B1	710.8	106.4	48.4	34.5	13.1
B2	709.8	114.8	50.7	33.4	14.4
B3	302.5	114.8	63.8	36.7	13.3
C1	1110.3	197.0	68.7	26.6	11.1
C2	871.9	407.2	47.2	26.2	14.0
D1	—	N.I.	N.I.	N.I.	885.5
D2	—	N.I.	N.I.	N.I.	794.2
E1	294.4	141.2	76.5	25.3	10.9
E2	661.9	64.1	85.9	23.2	10.9
F1	—	N.I.	N.I.	820.0	251.1
F2	—	—	—	N.I.	524.9
G1	596.9	201.8	—	28.1	15.4

N.I.:900(sec)まで加熱するが着火せず。

— :試験不実施

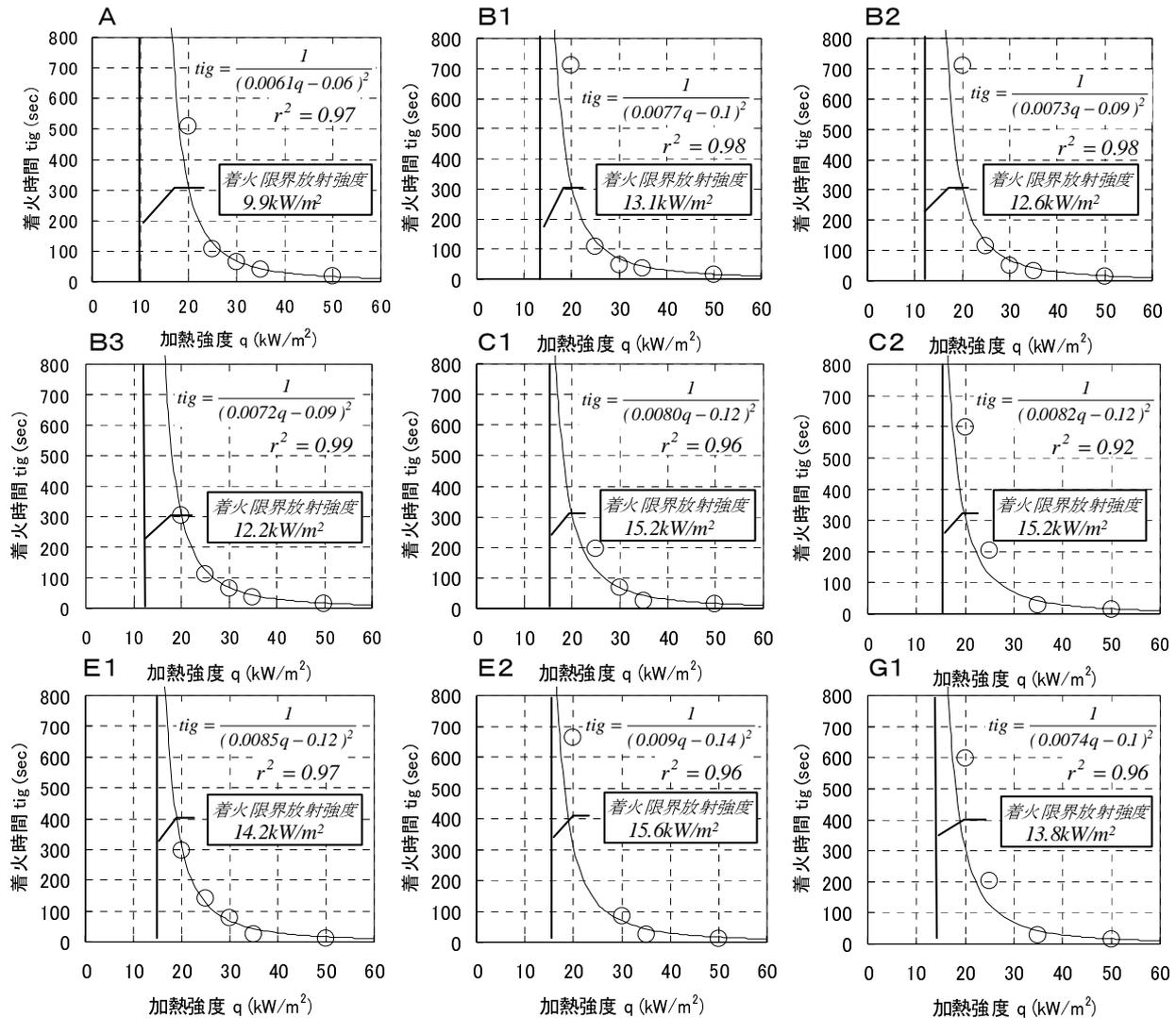


Fig.1 各試験体における加熱強度と着火時間の関係
Plots of Ignition Times against Irradiances of each Specimen

る。しかしながら、塗布量の相違による比較では、炭化促進系の塗料Cシリーズ、及びEシリーズにおいてが塗布量の増加に伴い、いずれも着火限界放射強度が減少している。一般に炭化促進系の塗料では木材内部への含浸量が多ければ多いほど、難燃性が向上することが過去の実験的研究⁷⁾において報告されているが、着火性能の指標である着火限界放射強度については塗料の含浸量に依存しない結果となった。

4.2 発熱速度及び総発熱量に関する分析

Fig. 3は加熱強度25kW/m²における無塗布、炭化促進系塗料、表面被膜系塗料の発熱速度の時間的推移を比較したものである。それぞれ木材特有の2つのピーク値をとる曲線を示している。炭化促進系の塗料(B3)では無塗布に比べて第1ピークの値が小さくなり、その後の発熱速度の落ち込みが300秒程度まで見られた。しかし、その後は無塗布と同様の値に戻り、第2ピークの値は逆に無塗布のそれより大きくなった。全体の燃焼時間も無塗布とほぼ同じであった。表面被膜系の塗料(C1)では炭化促進系と同様第1ピークの値は無塗布に比べて小さくなり、全体の燃焼時間は無塗布に比べて長くなった。また、第2ピークの値は無塗布と概ね同じ値となった。

Fig. 4は各種塗料における最大発熱量と加熱強度の関係を示したものである。すべての加熱強度において塗料を塗布したものは最大発熱速度が減少している。最大発熱速度の値は炭化促進系と表面被膜系ではあまり差異が見られない。

Fig. 5は着火から300秒までの平均発熱速度を比較したものである。すべての加熱強度において塗料を塗布したものは平均発熱速度も減少している。この平均発熱速度では炭化促進系の方が表面被膜系に比べて発熱速度が小さい傾向が見られる。

Fig. 6は各種塗料における総発熱量と加熱強度の関係を示したものである。総発熱量においても若干無塗布の値は大きいですが、差はそれ程顕著ではなく、また、各塗料間の値にほとんど差は見られなかった。

今回用いた炭化促進系の塗料は木材に強制含浸させて難燃性を向上させる難燃薬剤と成分が同じものである

が、文献⁷⁾によれば難燃処理された木材は薬剤の含有量が多いほど最大発熱速度や平均発熱速度が減少すると報告されている。今回の試験体は塗料として表面に塗布するだけなので、表面付近の薬剤が含浸している部分のみ難燃効果が現れ、着火した直後は発熱速度が小さくなる現象が観察されたと考えられる。しかし、この減少は一時的で、薬液が十分に浸透していない内部まで燃焼が進行すれば発熱速度の値は難燃処理を施していない木材の

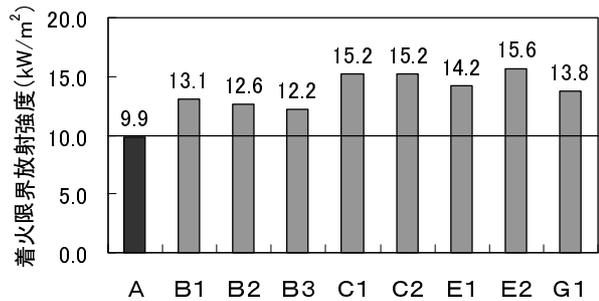


Fig.2 着火限界放射強度の比較
Comparison of Critical Heat Fluxes for Ignition

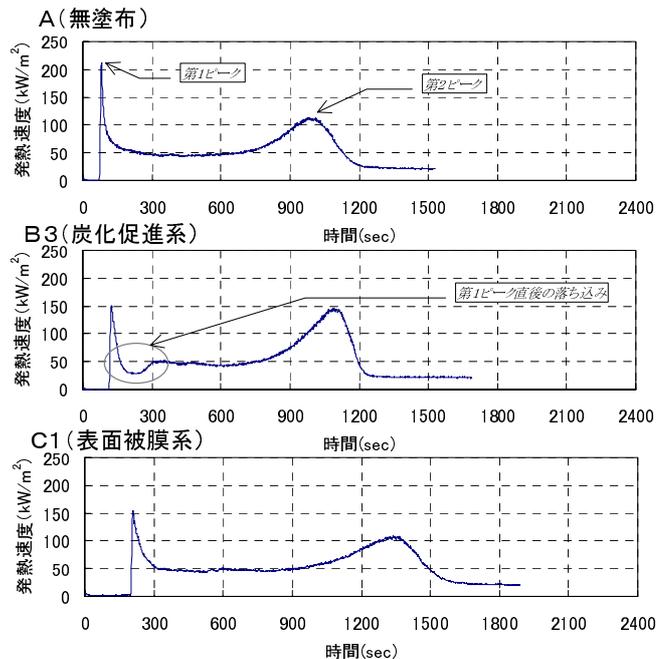


Fig.3 加熱強度25kW/m²における発熱速度の時間的推移
HRR Curves at 20kW/m² of Irradiance

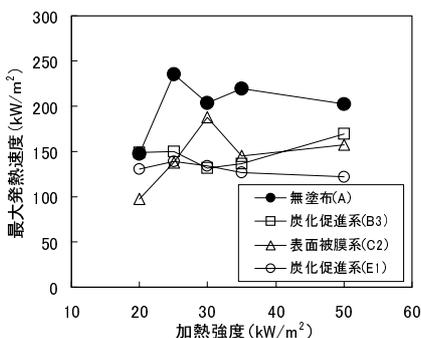


Fig.4 最大発熱速度の比較
Comparison of Maximum HRR

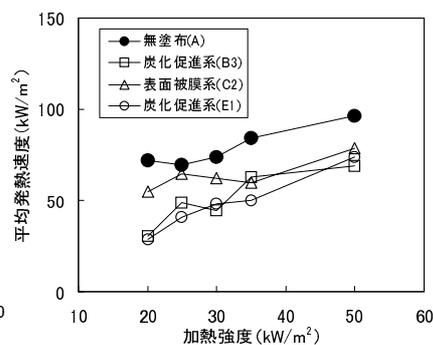


Fig.5 平均発熱速度 (着火後300秒) の比較
Comparison of Average HRR (t300)

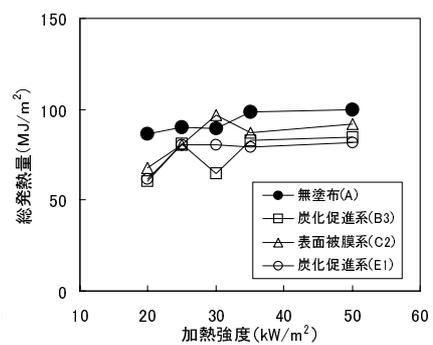


Fig.6 総発熱量の比較
Comparison of Total Heat Released

それと変わらなくなったと考えられる。

一方、表面被膜系は着火後も木材表面に塗布された無機系の塗膜が残存することで、基材内部への酸素の供給をある程度抑制する効果があるものと考えられる。Photo 2に、炭化促進系試験体 (B3 - 25kW/m²) と表面被膜系試験体 (C2 - 25kW/m²) 燃焼後の状況を示す。炭化促進系では燃焼後の状況は無塗布の試験体と全く同様で、単に木材が炭化燃焼したものであるが、表面被膜系では白い塗膜がひび割れながら大部分残存している。この残存塗膜が基材の燃焼速度を全体的に遅らせ、結果的に燃焼継続時間を長くさせたと考えられる。

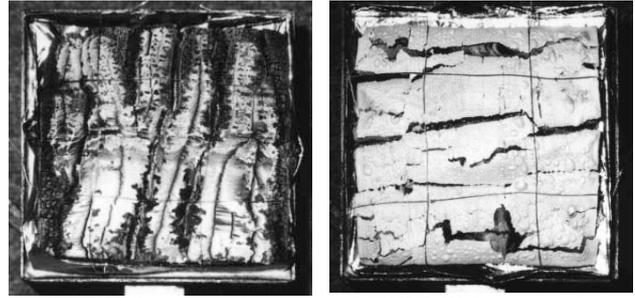
4.4 発泡系塗料における性能評価

Table 3は発泡系塗料における最大発泡厚さを示したものである。この表の数値を見れば、発泡の厚さは加熱強度によらず、単純に塗料の塗り厚さに依存することが分かる。これらの試験体は加熱開始直後から発泡し、最大発泡厚さは88.8mmに達している。したがって、試験開始後すぐに、着火装置に発泡層が接触して、重量減少等の正確な測定ができなくなるため、発泡後は着火装置のスパークを与え続ける事を止めている。また、発泡系塗料で着火に至ったケースでは、Fig. 7に示すように着火がアルミホイルのカバーと試験体側面との隙間で生じており、仮に側面も発泡層で覆われた場合ほどのケースでも着火に至らない可能性もある。Photo 3左は発泡性塗料を塗布した試験体が着火した直後の状況である。着火が側面のアルミホイルと試験体の間で起こっていることが分かる。また、Photo 3右は試験終了後の発泡性塗料試験体の発泡状況である。このように発泡系塗料を塗布した試験体を用いてコーンカロリメーター法の燃焼試験を行う場合には、発泡による着火装置の除去や、着火する部位の問題があり、他の試験体の試験結果と単純に比較できない場合があるため、試験方法については今後さらに検討する必要がある。

5. 類焼評価への適用とケーススタディ

類焼防止対策には、建物外壁における放射受熱量を如何にして小さくさせるかという放射を遮断する対策、建物外壁の着火防止性能を如何にして向上させるかという着火防止対策の2つがある。前者の対策には樹木、散水膜、遮へい板 (遮へい膜) 等が当てはまり、後者に防火塗料が当てはまる。これらの対策を複合的に使用することで、結果的に類焼防止が達成されればよいのであるが、対策に要するコストと実現性を考慮しつつ最適な対策を選定することが設計段階で要求される。

例えば、Fig. 8に示すように純木造寺院の敷地に面して間口10 m、奥行8 mの純木造建物が存在し、寺院本堂と純木造建物との距離は12 mで、間に1本の大きなトチノキがあると想定する。純木造建物が炎上した場合に火炎からの放射熱が最大となる寺社側の受熱点Pを仮定す



炭化促進系試験体 (B3-25kW/m²) 表面被膜系試験体 (C2-25kW/m²)

Photo 2 燃焼後の試験体表面の状況
Surface of Burned Specimens

Table 3 発泡系塗料における最大発泡厚さ
Maximum Thicknesses of Intumescent Layer

	加熱強度 (kW/m ²)				
	20	25	30	35	50
D 1	-	83.3	80.0	88.8	*
D 2	-	70.9	65.0	61.7	*
F 1	-	30.4	17.3	*	*
F 2	-	-	-	53.7	*

- : 試験不実施
* : 発泡後燃焼のため測定不可



D1-50kW/m²



D1-30kW/m²

Photo 3 発泡性塗料の着火直後の状況と発泡後の試験体
Just After Ignition and After Burning of Intumescent Specimen

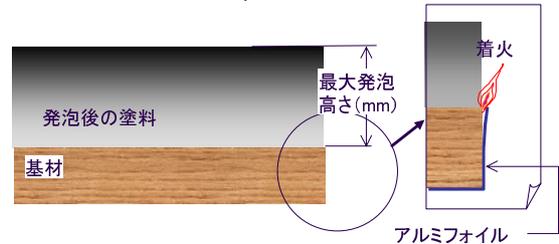


Fig.7 発泡塗料における着火の部位
Point of Ignition in Intumescent Specimen

ると、樹木のみの場合の放射受熱量 R_p (kW/m²) は、火炎の放射強度 I_f (kW/m²)、火炎面の形態係数 F_1 、樹木で遮断される部分の形態係数 F_2 、樹木での放射熱透過率 τ_t とおくと次式で表される。

$$R_p = (F_1 - F_2) \times I_f + \tau_t \times F_2 \times I_f \dots \dots \dots (1)$$

火炎面の形態係数は純木造建物の前面幅と火炎高さより幾何学的に求められる。トチノキの放射熱透過率は樹木の放射熱遮断効果に関する既往の研究⁸⁾より $\tau_t = 0.46$ であることがわかっているから、樹木のみの場合のP点での放射受熱量は $R_p = 13.4$ (kW/m²)となる。この場合、木材の着火限界放射強度10kW/m²を超えるため類焼判定は不合格となる (Table 4参照)。

上述の放射熱透過率を考慮した方法で樹木と寺院との

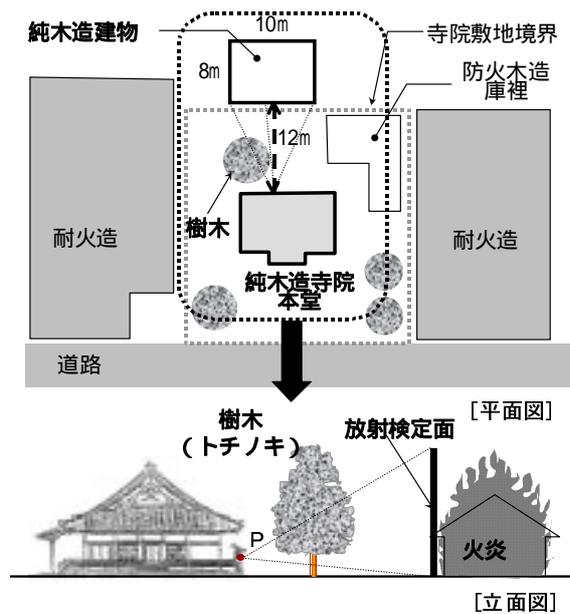


Fig.8 ケーススタディにおける各建物の位置関係
Position of Items in Case Study

Table 4 ケーススタディ結果
Results of Case Study

	P点での放射受熱量 kW/m ²	許容放射受熱量 kW/m ²	類焼判定
樹木のみ	13.4	10	NG
樹木+散水膜	9.2	10	OK
樹木+遮へい板	0.96	10	OK
樹木+防火塗料	13.4	15.2	OK

間に散水膜が付加された場合を想定するとP点での放射熱は同様のやり方で9.2kW/m²となり類焼判定は合格となる。また遮へい板が付加された場合はP点での放射熱は0.96kW/m²となり、これも合格となる。

一方、着火防止性能を向上させる対策として寺院本堂の外壁面に耐候性の高い表面被膜系の塗料を塗布すると想定すると、外壁面の着火限界放射強度は15.2kW/m²となる。P点での放射受熱量は13.4kW/m²であるから防火塗料を塗布することで類焼判定は合格となり、ドレンチャーや遮へい板など放射熱を遮断するタイプの対策は不要となる。

6. まとめ

本報告ではコーンカロリメーターを用いて各種木材用防火塗料の燃焼試験を行い、諸性能を検討した。これにより、以下の知見が得られた。

- 1) 発泡系塗料を除いたすべての防火塗料で無塗布の試験体と比較して限界着火放射強度が1.2～1.5倍大きくなった。つまり、着火防止性能が若干向上した。
- 2) 炭化促進系、および表面被膜系の塗料では最大発熱速度および着火後300秒間の平均発熱速度は無塗布と比べて減少した。これらの塗料では木材全体に難燃剤を含浸する手法と違って、表面付近のみ難燃処理が施される

ため、着火してから燃え尽きるまでの総発熱量は無塗布の木材と大きく変わりはないが、表面に残った塗膜が内部への酸素の供給を妨げることにより燃焼速度を緩める効果がある。

- 3) 表面被膜系の燃焼時間は無塗布の試験体と比較して長くなる。
- 4) 発泡系塗料は着火防止、燃焼抑制に最も効果があると考えられるが、今回得られたデータからは非発泡系塗料のデータと単純に比較することはできなかった。
- 5) 異なる加熱強度での着火時間の測定データより、着火限界放射強度を導出し、この値を用いて放射熱計算による類焼判定を行うことが可能である。

今後、実際の物件に適用する場合には、耐候性や塗布後の風合いの変化等の問題を解決する必要がある。今回選定した表面被膜系の塗料は耐候性に優れているため屋外での使用が可能であるが、発泡系および炭化促進系の塗料は耐水性がないため、屋外に露出した部分に使用する場合はトップコート塗布する等の対策が必要である。また、発泡系および表面被膜系の塗料では塗布後の木材の風合いが変化するので注意が必要である。なお、炭化促進系の難燃剤については材料内部に深く含浸すればするほど難燃性が高まるため、現場で容易に木材内部まで含浸させる工法等を検討する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、各塗料メーカーならびに販売代理店の方々より試験体の提供等、多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 増田秀昭, 斉藤文春, 須藤昌照: 難燃処理木材の耐火性, 日本建築学会大会学術梗概講演集, pp1395-1396, 1993
- 2) 上杉 三郎: 木質防火材料開発の動向 () - 最近の準不燃材料開発 -, 木材工業 Vol.53, No.3, 1998
- 3) 木造建築研究フォーラム: 図解木造建築, 日本建築センター, 1992
- 4) 添野豊, 津久井哲夫, 矢田貝明男: 含浸法による木質材料の難燃・不燃化技術開発, 栃木県工業技術センター研究報告, pp23-36, 1991
- 5) 日本建築センター: 建築物の総合防火設計法, 第2巻 出火防止設計法, 1989
- 6) 長谷見雄二: 放射熱を基準とする建築間火災拡大予測手法, 災害の研究, 第18巻, 1987
- 7) 原田寿郎, 上杉三郎: コーンカロリメーターによる難燃処理木材の燃焼性評価, 木材保存 Vol.22-5, pp262-271, 1996
- 8) (財)国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト 都市防火対策手法 成果集成版, 1983