

## 学位論文題名

## 火災初期の成長過程に対応した木材の燃焼特性および

## 難燃処理の効果に関する研究

## 学位論文内容の要旨

我が国では戦後の長きに渡り、都市防火対策の観点から木材や木造建築物に対する厳しい法規制が行われてきた。しかし、1980年代に入り、木材を一律に排除する防火政策が大きく転換され、建築物の火災成長過程に対応したきめ細やかな防火対策手法の開発が進められた。その結果、2000年には建築物の火災安全性を担保しつつ、多様な材料、構造方法を許容する「性能規定」の考え方が導入された。このような手法を木質内装空間の出火拡大防止対策に活かし、木質内装の可能な範囲を拡げていくためには、火災成長過程に対応した木材の燃焼特性、すなわち着火性、発熱性および火炎伝播性を把握することが不可欠となる。さらに、木材の燃焼性を抑制し、より積極的に木質内装の適用範囲を拡大するためには薬剤を用いた防火性能の向上を視野に入れることも必要となる。

これまでも木材に対する数多くの燃焼試験が行われてきているが、従来の試験の多くは建築材料としての防火性能をランクづけするための性格が強く、火災に対する材料の反応性を調べるという視点に十分に応えるものではなかった。そのため、特に木材については品質のばらつきや組織・構造の複雑さ、樹種の多様性も相まって、火災成長過程に対応した燃焼特性に関する知見の蓄積に欠けている部分が少なくない。

本論文は、発生からフラッシュオーバーに至るまでの火災の初期段階において、木材がどのような燃焼挙動を示す材料であるのか、また薬剤処理がどの程度木材の燃焼を抑制するのかを、着火性、発熱性、火炎伝播性に関する個別の実験結果から明らかにしようとしたものである。

第1章では、着火性、発熱性、火炎伝播性に関する既往の研究を調査し、着火時間予測式の適合範囲、難燃剤の発熱抑制効果、難燃処理木材の室空間における燃焼挙動、材料の表面形状や化粧層の発熱性や火炎伝播性に及ぼす影響など現在検討が待たれている課題のいくつかを示した。

第2章では、火災発生のトリガーとなる内装材への着火に係わる現象の中で、輻射加熱を受けた木材の着火時間や着火温度に対する樹種、入射熱強度および水分の影響をISO 5657着火性試験方法で検討した。次いで、薬剤による着火抑制効果を検討した。その結果、気乾木材の着火時間はほぼ密度にのみ依存すること、火災の初期・拡大期において内装材料に想定される30~40 kW/m<sup>2</sup>の入射熱範囲では、密度をパラメータとする簡易な予測式で着火時間が推定できること、その精度はこれまで提案されている推定式と同等以上であることを示した。一方、入射熱が小さい範囲で生じる予測値と実測値とのかい離は、着火に先行して材料表面に炭化層が形成されることを確認したことから、予測式に用いた木材

の熱的性質が炭化によって変化することが原因であると推測した。また、入射熱が小さいほど木材中の水分量が着火時間に大きく影響するようになることを明らかにした。

木材の着火温度は、樹種や着火時間が異なってもほぼ一定で、入射熱の強さに応じておおよそ 330℃付近または 390℃付近にあり、従来、異なるとされていた針葉樹と広葉樹の着火温度もほぼ同等であることを明らかにした。

難燃剤の着火抑制効果は入射熱の強さによって段階的に変化することがわかり、着火の遅延・阻止に必要な薬剤含量を求めるためには、内装材料に想定される入射熱に基づいて評価する必要があること、火災拡大期における内装材料への入射熱を 30 kW/m<sup>2</sup>とした場合、リン系薬剤では含量 80kg/m<sup>3</sup>以上、臭素系薬剤では含量 30kg/m<sup>3</sup>以上で着火が阻止されることを明らかにした。

第3章では、着火後の燃焼拡大とともに盛期火災期の火災室温度を左右する木材の発熱性について、10種類の薬剤の抑制効果、表面形状の影響および無機材料と積層した場合の発熱量の推定方法を ISO 5660 コーンカロリー計試験で検討した。さらに、室空間における難燃処理木材の燃焼挙動を室の模型試験で検証した。その結果、薬剤の発熱抑制効果はリン酸一グアニジン、リン酸二水素アンモニウム、リン酸水素二アンモニウム、ポリリン酸カルバメートが優れていた。木材の総発熱量を低下させるためには熱分解機構の異なる発炎燃焼と赤熱をそれぞれ抑制することが必要で、リン系薬剤は高い防災作用を示したものの、必ずしも赤熱を抑える防じん作用に優れているわけではなく、赤熱抑制効果の高い八ホウ酸ナトリウムとの組み合わせなど、難燃処理木材を開発する上で実用的に活用される有用な知見を得た。

木質系内装材料には、意匠上および音響上の理由から表面に細かい溝状の装飾が施されているものが多い。そのような材料の発熱量は形状ごとに個別に測定しなくても、平板の発熱量に対し溝による表面積の増加量を付加することでおおよそ推定できることを示した。また、木材は無機材料の表面化粧材として使用されることも多いが、そのような積層材料の総発熱量が、積層材料を構成する部材個々の発熱量の積算値におおむね一致することを明らかにした。このような推定手法を用いることによって、あらかじめ構成部材の発熱性を把握しておけば、それらを組み合わせた多様な木質化粧材料の防火性能はおおよそ推定可能となる見通しを得た。さらに、模型室内の空間温度はコーンカロリー計で測定される総発熱量と一定の関係があり、材料の燃焼試験結果を用いた室空間におけるフラッシュオーバー発生予測の可能性を見いだした。

第4章では、木質材料が使用される機会の多い壁面上の火炎伝播性について、上方伝播に及ぼす表面形状の影響、および水平または上方の伝播に対する薬剤による抑制効果を検討した。その結果、上方火炎伝播速度は水平方向のおおよそ 10 倍程度に達するが、外部加熱を受けない場合、火炎は試験体途中で燃え止まった。しかし、木材表面の細かい溝は上方向への火炎伝播を助長し、平板よりも高い位置まで伝播するようになることを明らかにした。また、水平方向・上方向とも木質壁面上の火炎伝播は難燃処理によって比較的容易に阻止できた。

初期火災の成長過程に対応させて木材および難燃処理木材の着火性、発熱性および火炎伝播性を個別に調べた以上の試験を通じて、それぞれに対する難燃処理の効果を明らかにした。現在、産業界では内装用途の準不燃木材や不燃木材への関心が高まっている。これまでに本研究で明らかにした薬剤の性能評価結果を基に、それらを組み合わせた木材用難燃剤が開発され、北海道内の企業で準不燃木材として実用化されているなど、新しい防火木材の開発に反映できる成果を得ることができた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 寺 沢 実  
副 査 教 授 平 井 卓 郎  
副 査 助 教 授 小 島 康 夫  
副 査 助 教 授 玉 井 裕

学 位 論 文 題 名

## 火災初期の成長過程に対応した木材の燃焼特性および 難燃処理の効果に関する研究

本論文は、図 45、表 19、引用文献 149 編からなる総頁 91 頁の和文論文である。参考論文 13 編が添えられている。

本論文は、発生からフラッシュオーバーに至るまでの火災の初期段階において、木材がどのような燃焼挙動を示す材料であるのか、また、薬剤処理がどの程度木材の燃焼を抑制するのかを、火災の成長に直接関与する材料の燃焼特性である 1) 着火性、2) 発熱性、3) 火災伝播性に関する個別の実験的研究から明らかにしようとしたものである。

1) 火災発生発端となる内装材への着火については、輻射加熱を受けた木材の着火時間や着火温度に対する樹種、入射熱強度、水分等の影響、および薬剤による着火抑制効果を ISO 5657 着火性試験方法で検討した。その結果、気乾木材の着火時間はほぼ密度にのみ依存すること、火災の初期・拡大期において内装材料に想定される  $30\sim 40\text{ kW/m}^2$  の入射熱範囲では、密度をパラメータとする簡易な予測式で着火時間が推定できることを示した。一方、入射熱が小さい範囲で生じる予測値と実測値とのかい離は、予測式に用いた木材の熱的性質が炭化によって変化することが原因であると推測した。また、木材の着火温度は、樹種や着火時間が異なってもほぼ一定で、入射熱の強さに応じておおよそ  $330^\circ\text{C}$  付近または  $390^\circ\text{C}$  付近にあり、これまで異なるとされていた針葉樹と広葉樹の着火温度はほぼ同等であることを明らかにした。次に、難燃剤の着火抑制効果は入射熱の強さによって段階的に変化することがわかり、着火の遅延・阻止に必要な薬剤含量を求めるためには、内装材料に想定される入射熱に基づいて評価する必要があることを明らかにした。

2) 着火後の燃焼拡大を左右する木材の発熱性については、10 種類の薬剤の発熱抑制効果、表面形状の影響および無機材料と積層した場合の発熱量の推定方法を ISO 5660 コー

ンカロリー計試験で検討した。さらに、室空間における難燃処理木材の燃焼挙動を室の模型試験で検証した。その結果、薬剤の発熱抑制効果はリン酸一グアニジン、リン酸二水素アンモニウム、リン酸水素二アンモニウム、ポリリン酸カルバメートが優れていた。木材の総発熱量を低下させるためには熱分解機構の異なる発炎燃焼と赤熱をそれぞれ抑制することが必要で、防炎作用が高いリン系薬剤と赤熱抑制効果の高い薬剤、例えば八ホウ酸ナトリウムとを組み合わせるなど、難燃処理木材を開発する上で実用的に活用される知見を得た。次に、表面に細かい溝状の装飾が施された木質系材料の発熱量は、平板の発熱量に対し溝による表面積の増加量を付加することでおおよそ推定できること、積層材料の発熱量は構成部材個々の発熱量からおおよそ推定可能となる見通しを得た。さらに、模型室内の空間温度はコーンカロリー計で測定される総発熱量と一定の関係があり、材料の燃焼試験結果を用いた室空間におけるフラッシュオーバー発生予測の可能性を見いだした。

3) 壁面上の火炎伝播性については、上方伝播に及ぼす表面形状の影響、および水平または上方の伝播に対する薬剤による抑制効果を検討した。その結果、上方火炎伝播速度は水平方向のおおよそ 10 倍程度に達するが、外部加熱を受けない場合、火炎は試験体途中で燃え止まった。しかし、木材表面の細かい溝は上方向への火炎伝播を助長し、平板よりも高い位置まで伝播するようになることを明らかにした。また、水平方向・上方向とも木質壁面上の火炎伝播は難燃処理によって比較的容易に阻止できた。

木材および難燃処理木材の着火性、発熱性および火炎伝播性を個別に調べた以上の試験を通じて、それぞれに対する難燃処理の効果を明らかにした。現在、産業界では内装用途の準不燃木材や不燃木材への関心が高まっている。すでに、本研究で明らかにした薬剤の性能評価結果を基にそれらを組み合わせた木材用難燃剤が開発され、北海道内の企業で準不燃木材として実用化されているなど、新しい防火木材の開発に反映できる成果を得た。

本研究は、木材の燃焼特性と難燃処理の効果を明らかにしたもので、業界の発展に寄与するとともに、学術的にも関連学・協会等においても高く評価されている。よって、審査員一同は、菊地 伸一が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。