

特集 「火災に強い都市をめざして」

耐火集成材（シグマウッド™）の開発

山口 純一 堀 長生  
高橋 晃一郎 丹羽 博則

Development of Fire Resistance Wooden Structure -  $\Sigma$  Wood™ -

Jun'ichi Yamaguchi Nagao Hori  
Koichiro Takahashi Hironori Niwa

Abstract

Wooden structural members with a one-hour fire rating have been developed to achieve the fire resistant wooden structures. These members are composed of three layers, a surface layer, a self-charring-stop layer, and a load-supporting portion, and they don't need a non-flammable fire-protection covering. A loaded fire resistance test confirmed one-hour fire resistance for a column member using larch for the surface layer and load supporting portion, and jarrah for the self-charring-stop layer. Furthermore, a non-stationary thermal conductive analysis was performed to examine the relations between the member section size and the characteristics of the self-charring-stop layer.

概要

木質構造による耐火建築物を実現するために、1時間耐火を目標性能とする木質構造部材の開発を行った。開発した木質部材は、断面が「燃え代層、燃え止まり層、荷重支持部」の3層から構成され、不燃性の耐火被覆材を必要としない点が特長である。燃え代層と荷重支持部にカラマツ、燃え止まり層にジャラを用いた柱部材について載荷加熱実験を行った結果、1時間の耐火性能を満たすことを確認した。また、部材断面の大きさと燃え止まり性能との関係を定量的に把握するために、非定常熱伝導解析を行った結果についても併せて報告する。

1. はじめに

地球環境問題への意識の高まりを背景に、炭素排出量が少なく、かつ炭素を固定できる木造建築は、環境に優しい建築として再評価される気運が高まっている。また、日本における豊富な森林資源の有効活用策としても、木造建築市場の拡大・活性化が強く求められている。

一方では、2000年に施行された改正建築基準法により、建築設計体系も従来の仕様規定型から性能規定型へと見直しが行われた。木造建築物についても、Fig. 1に示す床面積・階数、あるいは、高さ等の規模制限が緩和され、耐火建築物としての性能を証明できれば、鉄筋コンクリート構造や鉄骨構造と同等の建築物を建設できる環境が整

った。しかしながら、耐火建築物には「火災の継続中だけではなく鎮火後も建物は倒壊せず、構造部材が常時荷重を安全に支持し続けることができる」という、木質構造にとっては厳しい条件が課せられており、大きな課題となっている。

一般に、木質部材は長時間の火熱にさらされると、表層部に多くの熱が蓄えられると共に、木材自身からの発熱によって火災終了後も燃焼を継続し、自己消火に至るまでには相当の時間を要する、あるいは、Photo 1のように燃え止まらずに消失してしまうことは、よく知られている。従って、木質材料を耐火建築物の主要構造部に適用するためには、何らかの防火対策が別途必要となる。耐火性能を付与する方策としては、木質構造部材に不燃性の耐火被覆を

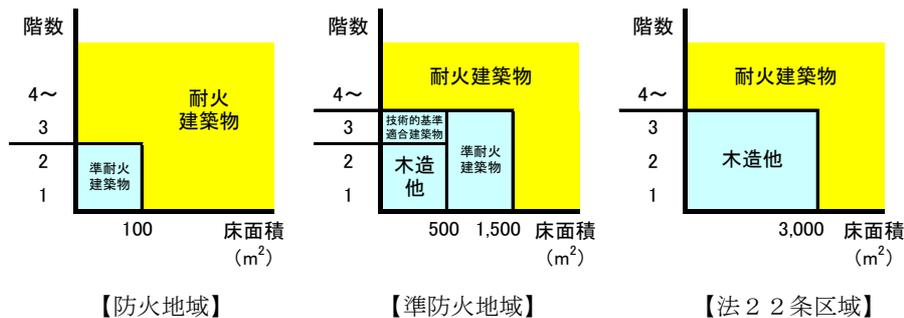


Fig. 1 建築基準法による床面積・階数の制限

Restriction of floor area and stories on the Japanese building standard law

施す方法や、鉄骨構造部材に木材の被覆を施す方法が、既に提案されている。<sup>1)</sup>

一方、著者等は、純木質構造の耐火建築物を実現することを最終目標として、1時間耐火性能を有し、かつ、自身で燃え止まる木質構造部材の開発を試みている<sup>2)~5)</sup>。開発した部材は、Fig.2 に示すように、断面が「荷重支持部、燃え止まり層、燃え代層」の3層から構成される集成材であり、不燃性の耐火被覆を必要としない点が特長である。

焼物に水をかけると、水の蒸発潜熱によって熱が奪われ消火に至るが、本提案の部材は、この熱吸収による消火の原理を応用したものであると言える。すなわち、燃え代層の内側（燃え止まり層）に一種の熱吸収体を内蔵し、この熱吸収体が、火災による火熱および燃え代層自身の燃焼熱を吸収することによって、耐火性能を飛躍的に向上させるものである。

上記原理に基づいて検討した、各層の機能および使用材料を下記に整理する。

- 1) **荷重支持部** 火災後も健全な状態で構造耐力を保持する。一般的な構造用集成材を用いる。
- 2) **燃え止まり層** 荷重支持部の周囲に配置する。荷重支持部への熱伝達を抑制し、さらに燃え代層の燃焼熱を吸収するため蓄熱性能の高い材料（高比重木材、モルタル等の高熱容量材料）を用いる。なお、燃え止まり層の一部または全部に木材を用いることによって、荷重支持部、燃え止まり層および燃え代層の構造的な一体性を保っている。
- 3) **燃え代層** 燃え止まり層の周囲に配置する。燃え止まり層が直接加熱されることにより熱吸収能力を失うことを防止する機能を必要とする。一般的な炭化深さ（45mm程度）以上の厚さを持つ一般的な構造用集成材を用いる。
- 4) **隅角部補強材** 部材隅角部の燃え代層内に配置し、2方向から熱・火炎を受ける弱点部分を補強する。燃え止まり層と同様、蓄熱性能の高い材料（高比重木材、高熱容量材料等）を用いる。

本提案の部材は、不燃性の耐火被覆材や鉄骨構造部材に木材の被覆を施す方法に比べると、仕上げ面が木材であり木質構造の質感を損なわない、また、木材だけで構成した純木部材であり、集成材メーカーの既存設備だけで製造が可能、といった点で優れていると言える。

本報では、荷重支持部と燃え代層にカラマツ材、燃え止まり層にジャラ材を用いた集成材柱について、国土交通大臣認定（柱1時間耐火性能）を取得する目的で行った、載荷加熱実験の結果を報告する。また、部材断面の大きさと燃え止まり性能との関係を定量的に把握するために、非常熱伝導解析を行った結果についても併せて報告する。

## 2. 柱部材の載荷加熱実験

### 2.1 試験体

Table 1 は、試験体の諸元を示したものである。

試験体の種類は、断面寸法と耐火性能の関係を把握するため、断面寸法が異なる2種類の試験体を各1体作成した。

試験体長さは、何れも3,500mmである。以下では、断面寸法424×424mmの試験体を試験体A、断面寸法574×574mmの試験体を試験体Bと呼ぶ。

荷重支持部の寸法は、試験体Aは250mm角、試験体Bは400mm角とした。荷重支持部の樹種は、試験体A、Bともにカラマツとした。

燃え止まり層の樹種と厚さは、試験体A、Bに共通とし、樹種はジャラ、厚さは27mmとした。

燃えしろ層の厚さも試験体A、Bに共通とし、樹種は荷重支持部と同一のカラマツ、厚さは15mm程度の安全しろを加えて60mmとした。



Photo 1 火災後の一般的な木質部材  
General Wooden Material after Fire Exposure

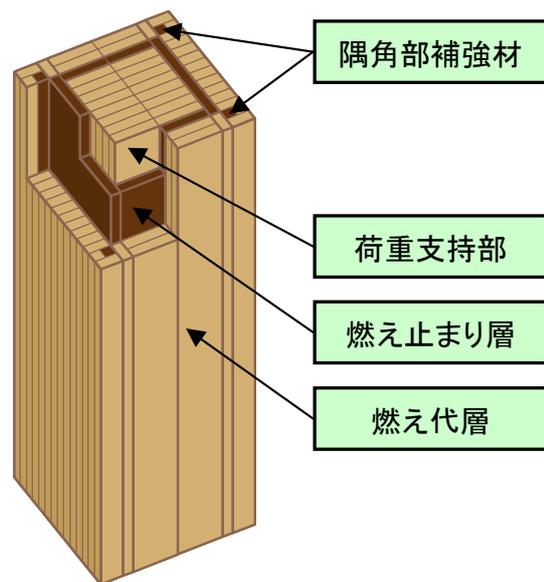


Fig. 2 3層構成の集成材部材の概念図  
Glued Laminated Timber Composed of Three-Layers

隅角部補強材の大きさは、何れの試験体も27mm角とした。なお、各試験体の含水率と気乾比重の平均値は、試験体Aのカラマツが（8.1%, 0.37）、ジャラが（12.8%, 0.79）、一方の試験体Bのカラマツが（7.0%, 0.41）、ジャラが（13.9%, 0.77）であった。

Table 1 柱試験体の諸元  
Specification of Test Column Speciment

試験体番号	A	B
柱断面寸法	424×424mm	574×574mm
長さ	3.5m	
荷重支持部	寸法	250×250mm
	樹種	カラマツ
燃え止まり層	厚さ	27mm
	樹種	ジャラ
燃えしろ層	厚さ	60mm
	樹種	カラマツ
隅角部補強材	寸法	27×27mm
	樹種	ジャラ

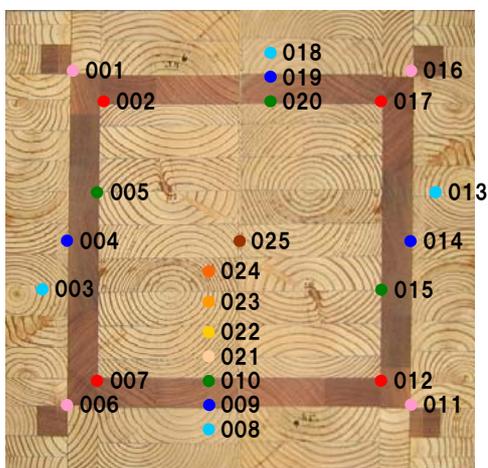
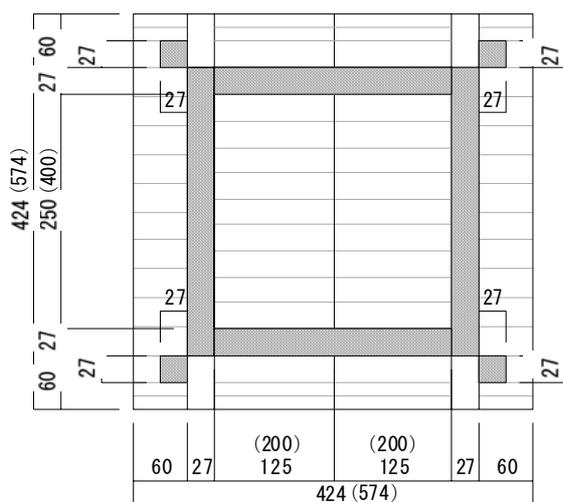


Fig. 3 断面形状および熱電対配置  
Specimen section and Thermocouples Arrangement

Fig. 3は、断面形状および温度測定位置をそれぞれ示したものである。

## 2.2 実験方法

荷重加熱試験は、財団法人日本建築総合試験所の柱炉を用いて実施した。試験体は柱炉内に垂直に設置し、Fig. 4に示すように上下小口面に設けた鋼製プレートを通じて、一定の軸圧縮荷重を載荷しながら加熱を行った。

載荷荷重 (P) は、試験体の荷重支持部に対する、座屈低減係数を考慮した長期許容圧縮応力度相当とした。すなわち、下式の通り、カラマツ材（構造用集成材強度等級：E95-F315、基準材料強度（圧縮）： $F_c=25.8 \text{ N/mm}^2$ ）の長期許容圧縮応力度に、座屈低減係数（ $\eta$ ）を乗じたものとした<sup>8)</sup>。

$$P = (1.1/3) \times F_c \times \eta \times (\text{荷重支持部の断面積}) \quad (1)$$

なお、載荷は加熱中および加熱終了後も、燃え止まりが確認されるまで継続した。

加熱については、試験体表面付近の温度が、IS0834で規定される標準加熱温度曲線に沿うように、シース熱電対により制御しながら行った。60分の加熱後、燃え止まりが確認できるまで約6～7時間程度、炉内に放置した。試験体内部の温度は、線径φ0.65mmのK型熱電対を用いて測定した。測定位置は、Fig. 2に示す通り、燃え代層各4面の深さ35mmの位置をはじめ、燃え止まり層の外側と内側（各4面

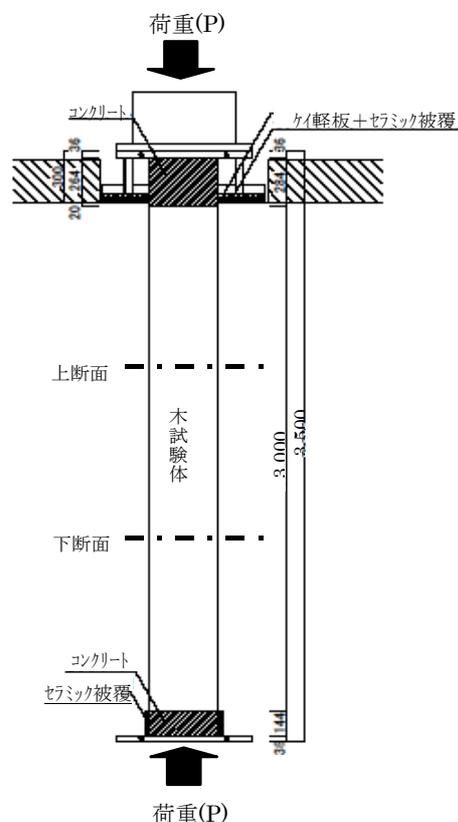


Fig. 4 載荷加力実験の方法  
Loaded Fire Resistance Test

と隅角部），荷重支持部の深さ方向に試験体Aで25mmピッチ，試験体Bでは40mmピッチの位置とした。

また，試験体の軸方向変形については，加力装置下部にある加力治具の四隅の変位を変位計で測定した。

### 2.3 実験結果および考察

試験体A, Bは，共に燃え止まりの性状を示し，最終的に炉扉を開いて目視で燃え止まり確認した。

Table 2は，燃え止まりを確認した時間および最大軸方向変形量を示したものである。

Table 2より，測定終了時の収縮変形の割合を算定すると，試験体長さ（H=3500mm）に対して，試験体Aで（H/1,144），試験体Bで（H/1,224）であり，評価基準<sup>9)</sup>の（H/100）に比べて十分小さいことが確認できた。

Fig. 5, Fig. 6は，各試験体の炉内加熱温度と内部温度を示したものである。

Fig. 5, Fig. 6より，燃え代層の表面から35mm位置の温度（グラフ中の水色のライン）は，加熱終了後（60分以降）も上昇し，試験体Aで400℃付近，試験体Bで700℃付近にまで達している。しかし，ピーク値を示した以降は二次燃焼を生じることもなく徐々に温度減衰していることが分かる。一方，燃え止まり層の隅角部外側の温度（グラフ中のピンク色のライン）は，試験体A, Bともに加熱開始後150分頃の230～260℃程度以下に抑えられている。その他の部分の温度も，いずれも200℃未満に抑えられている。これより，本研究で提案している部材の燃え止まり性能を証明することができた。なお，図示はしていないが，これ以降の時間も温度は順調に低下し，そのまま翌日まで放置しても2次燃焼が生じないことを確認している。

Fig. 7は，軸方向変形の変化を示したものである。

Fig. 7より試験体の軸収縮変形は加熱終了後も，徐々に増加していることが分かる。しかしながら，燃え止まりを確認した時点で，変形はほぼ頭打ちとなる傾向を示しており，この後も，急増することはないと判断される。

Photo 2(a, b), Photo 3(a, b)は，各試験体の加熱前後の全体写真を示したものである。また，Photo 3およびPhoto 4は，試験を実施した翌日に試験体を切断し，その時の切断面の写真を示したものである。

各写真より，試験終了後に座屈等を生じることもなく，また，燃え代層の45mm深さ付近まではほぼ一様に炭化しているが，他の部分は健全であることが確認された。

Table 2 燃え止まり確認時間，及び，最大軸変形  
Self-Charring Stop Time and Maximum Axial-Deformation

試験体記号	加熱時間(分)	燃え止まり確認時間(分)	試験荷重(kN)	最大軸変形(mm)
A	60	440	485	3.06 (440分)
B	60	509	1505	2.86 (500分)

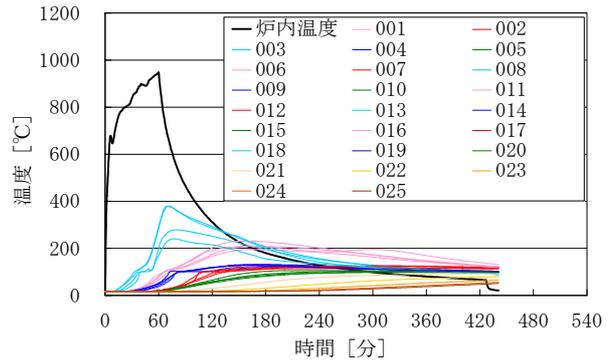


Fig. 5 加熱温度と試験体内部温度（試験体A/上断面）  
Heating and Specimen Temperature  
(Specimen A / Upper Section)

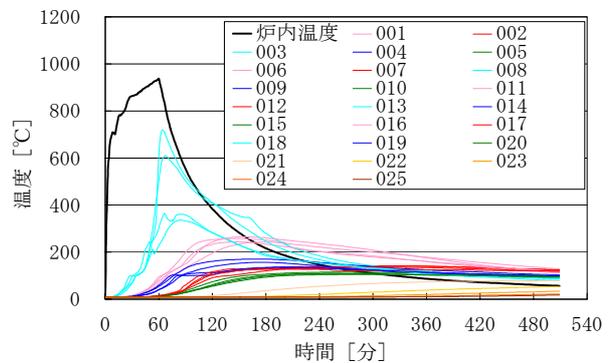


Fig. 6 加熱温度と試験体内部温度（試験体B/上断面）  
Heating and Specimen Temperature  
(Specimen B / Upper Section)

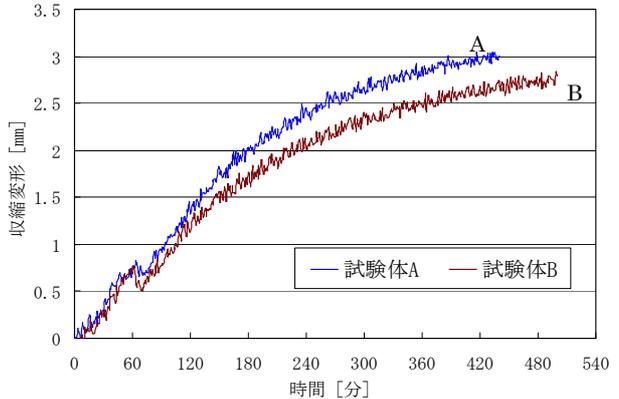


Fig.7 軸方向変形  
Axial Deformation of Specimen

## 3. 熱伝導解析による基本検証

### 3.1 解析手法

本提案部材の荷重支持部の断面寸法と，燃え止まり性能との関係を定量的に把握することを目的として，有限要素法による2次元非定常熱伝導解析を行った。

部材断面の大きさとして，前章の実験試験体A, Bに対応する（424×424 mm）および（574 ×574 mm）と，その中間

の大きさを持つ（454×454 mm, 494×494 mm, 534×534 mm）の、計5断面を対象として解析を行う。各断面とも対象性を考慮して1/4の部分を実算対象として要素分割を行った。なお、何れの断面寸法においても、燃えしろ層の厚さ（60mm）と樹種（カラマツ）、燃え止まり層の厚さ（27mm）と樹種（ジャラ）および荷重支持部の樹種（カラマツ）は同一とし、荷重支持部の断面寸法のみ250×250mm～400×400mmの間で変化させた。

1) 要素分割 Fig. 9は、一例として、断面寸法424×424 mmにおける要素分割を示したものである。解析メッシュは、ある程度の間隔で亀裂を設定する必要があるため、ラミナ幅/2～ラミナ幅程度のメッシュ間隔とし、隅角部の温度分布が問題となる所は、さらに細かく設定した。また、表面にできる亀裂は、ラミナ厚さ程度の間隔で発生することが知られているので、今回の解析では27～50mm 間隔とした。

2) 加熱温度、放冷温度 Fig. 10 は、解析に用いた加熱温度曲線と放冷温度曲線を示したものである。加熱温度は、ISO834で規定された標準加熱曲線とし、放冷温度は前章で示した試験体Aの実測値に基づく炉内温度とした。

3) 解析モデル 解析モデルは、原田らのモデル<sup>6)</sup>を用いた。本解析モデルでは、表層面にできた亀裂により加熱周長が増加し、結果的に部材表面へ入射する熱量が増加する計算を行っている。

4) 材料特性 Table 3 は、解析で用いたカラマツ、ジャラの全乾密度および含水率を示したものである。全乾密度および含水率については、同仕様の試験体で別途実測したデータを使用した。その他の物性値は、文献<sup>6)</sup>に従った。

### 3.2 解析結果および考察

Fig. 11～Fig. 13は、各断面モデルに対する解析結果として、中央部（表層から60mmの位置）と隅角部（表層から85mmの位置）の温度変化および最高温度を、各断面モデル間で比較したものである。

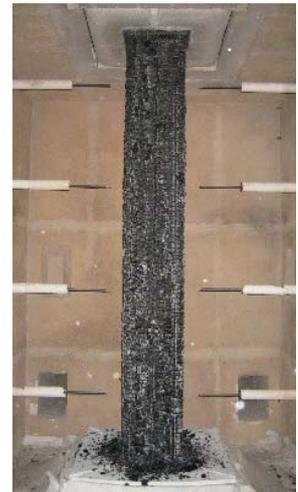
また、Fig. 14～Fig. 18は、各断面モデルに対する解析結果として、最高温度および最終的な残量比の分布を示したものである。また、

これらの結果より、表層部における温度分布は、荷重支持部断面の大きさに対する依存度は非常に小さいことが分かる。よって、前章の実験で示した試験体A, Bの中間の大きさを有する部材断面でも、特性は大きく異なることはない判断できる。

なお、本解析結果は加熱開始から4時間後までの状態を示したものである。燃え代層付近の最高温度や最終的な残量比を知る上では4時間程度の予測で問題はないが、荷重支持部の最高温度や終局耐力を予測する場合には、荷重支持部が最高温度を示す12時間後程度までの予測を行う必要がある。また、荷重支持部の温度は、断面の径に大きく依存するため、表層部の温度履歴と異なる傾向を示すことは予想される。



【試験前】

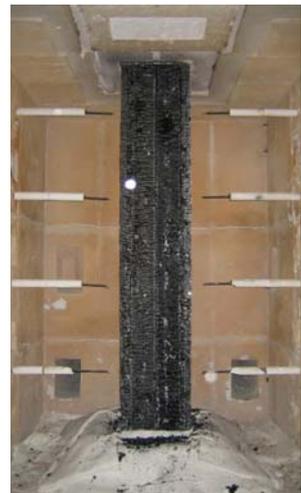


【試験後】

Photo 2 加熱前後の試験体A  
Specimen A before and after Test



【試験前】



【試験後】

Photo 3 加熱前後の試験体B  
Specimen B before and after Test



【試験体A】



【試験体B】

Photo 4 加熱後の各試験体の断面  
Section of specimen A and B after test

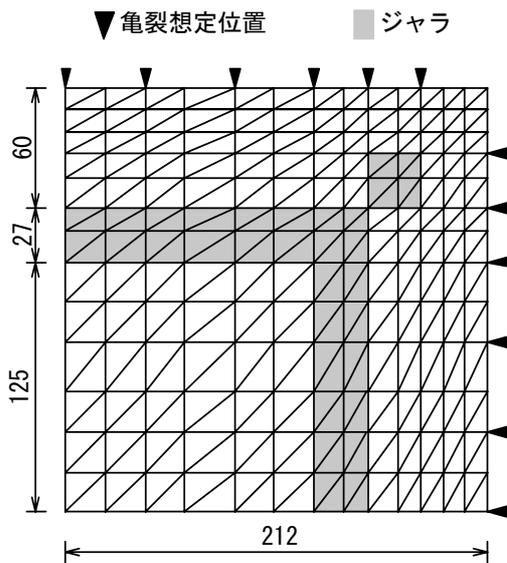


Fig. 9 要素分割例（部材断面：424mm×424 mm）  
Example of Element Mesh  
(Section Size: 424mm×424 mm)

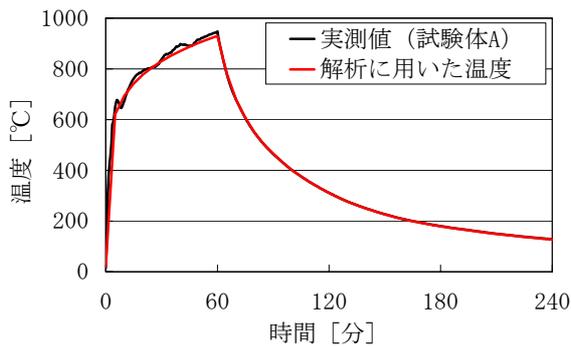


Fig. 10 解析に用いた加熱・放冷温度曲線  
Heating and Cooling Temperature Curve Used  
in Analysis

Table 3 解析に用いた材料特性  
Material Characteristic Used in Analysis

樹種	カラマツ	ジャラ
全乾密度[kg/m <sup>3</sup> ]	0.47	0.83
質量含水率[-]	0.094	0.124
終局残量比[-]	0.31	0.31 <sup>注1)</sup>
収縮係数σ[-]	0.34	0.34 <sup>注1)</sup>
収縮率s[-]	$s = \sigma(1 - R)^2$ <sup>注2)</sup>	
亀裂深さ幅比[-]	3.75	3.75 <sup>注1)</sup>

注1)安全側の仮定としてカラマツの値を用いた。  
注2)Rは残量比[-]であり、炭化後の密度と炭化前の密度に対するの比である。

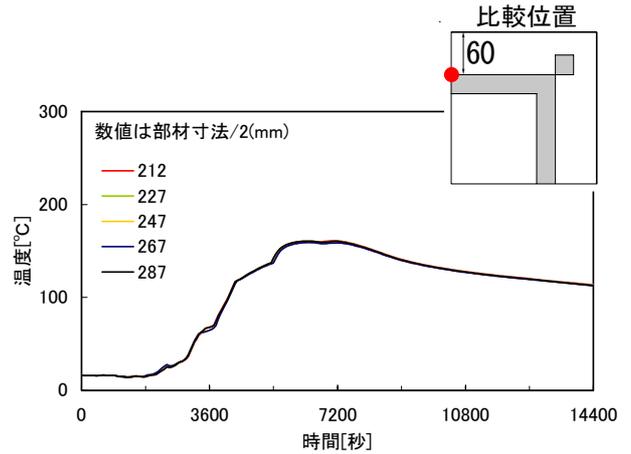


Fig. 11 中央部（表層から60mm）温度の比較  
Comparison of Temperature on Center

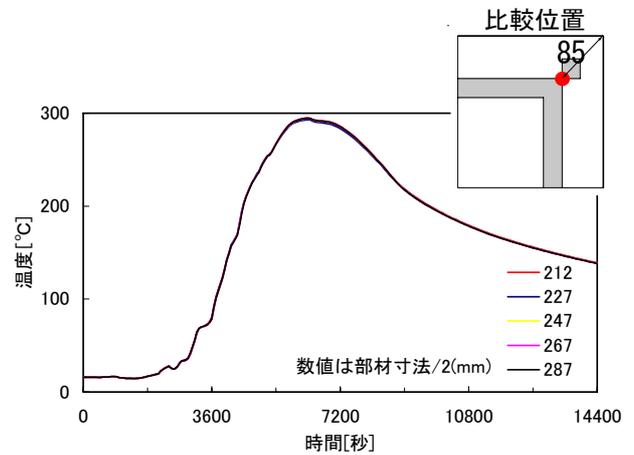


Fig. 12 隅角部（表層から85mm）温度の比較  
Comparison of Temperature on Edge

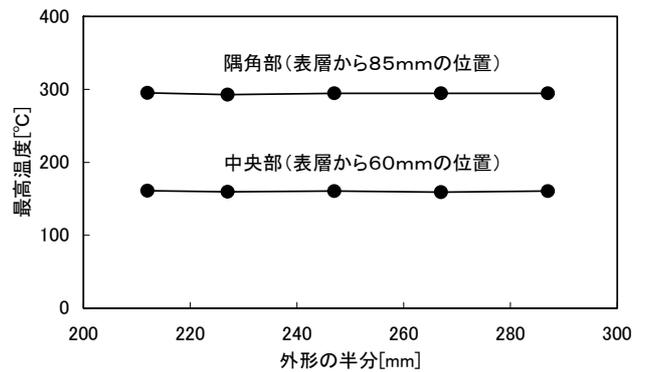


Fig. 13 部材断面寸法と最高温度の関係  
Relation between Member Section Size and Maximum  
Temperature

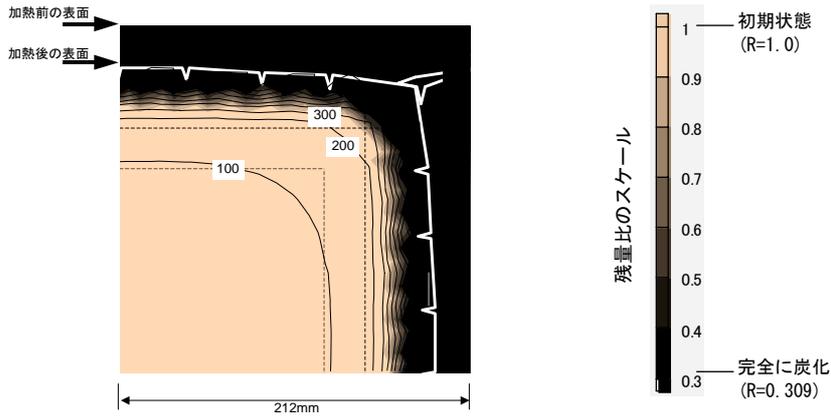


Fig. 14 最高温度と残量比 (424mm×424 mm)  
Maximum Temperature and Remainder Ratio  
(424mm×424 mm)

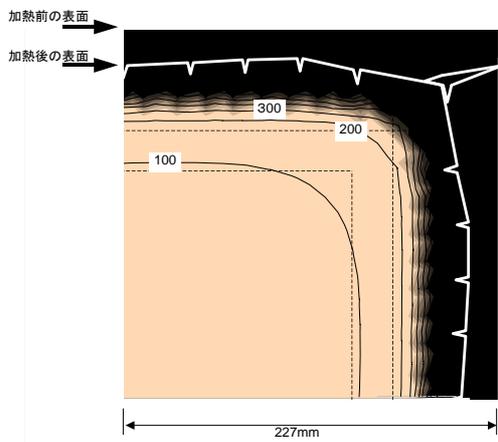


Fig. 15 最高温度と残量比 (454mm×454 mm)  
Maximum Temperature and Remainder Ratio  
(454mm×454 mm)

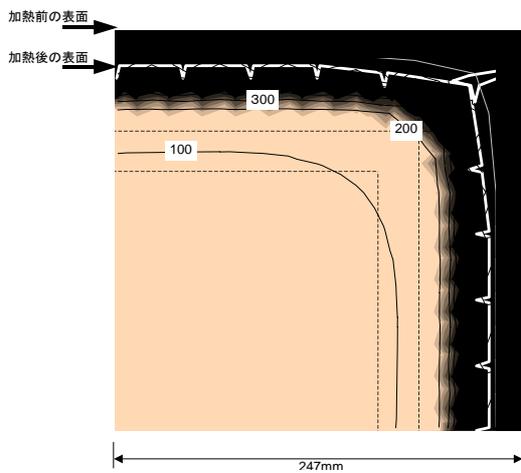


Fig. 16 最高温度と残量比 (494mm×494 mm)  
Maximum Temperature and Remainder Ratio  
(494mm×494 mm)

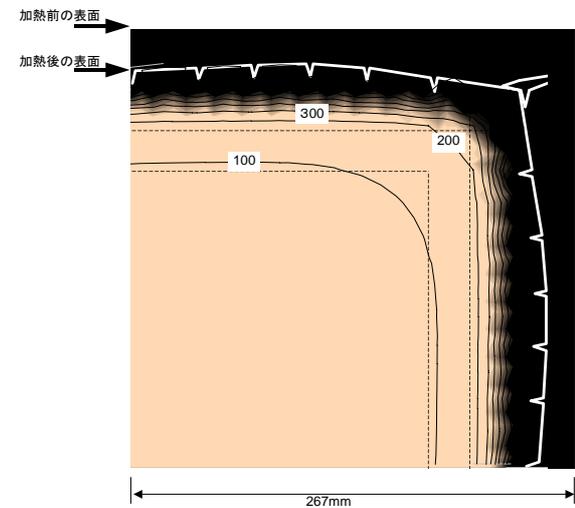


Fig. 17 最高温度と残量比 (534mm×534 mm)  
Maximum temperature and Remainder Ratio  
(534mm×534 mm)

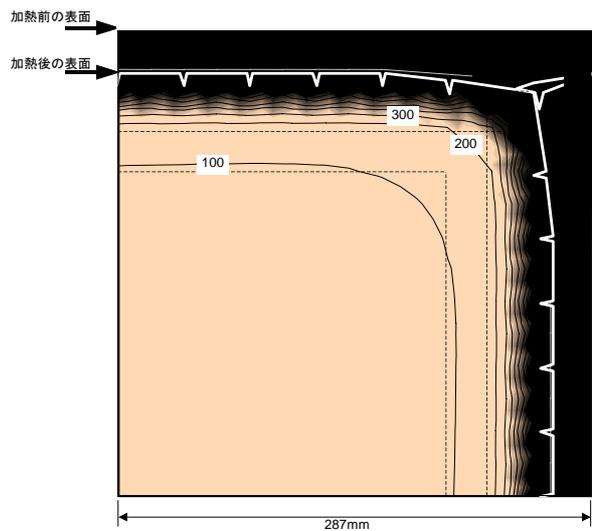


Fig. 18 最高温度と残量比 (574mm×574 mm)  
Maximum Temperature and Remainder Ratio  
(574mm×574 mm)

#### 4. まとめ

本報告では、純木質構造の耐火建築物を実現することを最終目標として、1時間耐火性能を有し、かつ、自身で燃え止まる木質構造部材を開発した。開発した部材は、断面が「荷重支持部、燃え止まり層、燃え代層」の3層から構成される集成材であり、不燃性の耐火被覆を必要としない点が特長である。これまでに提案されている耐火木質部材、すなわち不燃性の耐火被覆材や鉄骨構造部材に木材の被覆を施す方法に比べると、木質構造の質感を損なわない点、集成材メーカーの既存設備だけで製造が可能である点、等で優れていると言える。

実際に、荷重支持部と燃え代層にカラマツ材、燃え止まり層にジャラ材を用いた集成材柱部材について载荷加熱実験を行った結果、1時間の耐火性能を有することが確認された。

また、部材断面の大きさをパラメータとした熱伝導解析を行い、断面の大きさと表層部の炭化深さ、温度分布等との関係を定量的に評価した。その結果、断面の大きさが燃え止まり性状に与える影響は非常に小さく、よって、耐火性能上、本部材の断面サイズや適用範囲が大きな制約を受けるものではないことを確認した。

なお、2章で示した加熱実験試験体の柱仕様については、国土交通大臣より認定書（柱1時間耐火構造）を取得した（認定番号：FP060CN-0240）。

#### 謝辞

本研究は、2003年より株式会社竹中工務店と実施している2社共同研究開発における成果の一部である。共同開発

者である株式会社竹中工務店技術研究所の安部裕氏、大橋宏和氏、岡日出夫氏には、特にご支援をいただいた。記して、関係各位に深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 安井昇, 他: 国産スギ材を用いた木造耐火建築物の開発, (財)日本建築総合試験所「GBRC」, Vol.31, No.2, pp.6~16, (2006.4)
- 2) 山口純一, 他: 木質構造部材の燃え止まりに関する研究, 日本火災学会研究発表会, pp.24~27, (2004.5)
- 3) 堀長生, 他: 燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究(その1 火災終了後の自己燃焼に関する実験的検討), 日本建築学会大会, pp.149~150, (2004.8)
- 4) 丹羽博則, 他: 燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究(その2 火災終了後における熱分解層の熱収支モデル), 日本建築学会大会, pp.151~152, (2004.8)
- 5) 大橋宏和, 他: 燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究(その3 木製柱の载荷加熱実験), 日本建築学会大会, pp.89~90, (2006.9)
- 6) 原田和典, 他: 木質構造部材の炭化性状に関する数値解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第44号, 環境系, pp.209~212, (2004.6)
- 7) 常世田昌寿, 他: 木質系構造の耐火性能に関する研究(その2 1:H鋼内蔵型カラマツ集成材の柱部材温度予測), 日本建築学会大会, pp.133~134, (2005.9)
- 8) 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 日本建築学会, (2002)
- 9) 防耐火性能試験・評価業務方法書, (財)日本建築総合試験所, 2005.10変更