

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20466

研究課題名(和文)木質耐火構造部材の高度化と断面制御の両立性の研究 - 木造建築の高層化に向けて -

研究課題名(英文) Compatibility of Sophistication of Wooden Fire-Resistant Structural Members and Cross-Section Control - Toward High-Rise Wooden Buildings

研究代表者

伯耆原 智世 (Hokibara, Tomoyo)

早稲田大学・理工学術院・専任講師

研究者番号：70908061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：高層建築全体を木造で成立させるのに必要な耐火性能と、部材断面寸法の関係について、難燃処理木材を燃え止まり層に用いた木質構造部材を対象として、以下の成果を得た。(1) 15階建て以上が建築可能となる3時間耐火性能を確保する断面構成の見通しを得た。(2) 燃え止まり層のラミナ方向をラミナ収縮や亀裂が起こりにくい方向とすること、また燃え止まり層に不燃材料相当の難燃処理木材を使用することにより、炭化深さを低減できることを明らかにした。(3) 難燃薬剤量の増加による炭化深さの低減効果は、加熱中に比べて放冷中に大きいことを明らかにし、被覆層の軽量化に寄与する手法の一つとなり得ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既に開発済みの2時間耐火部材の被覆層厚さ程度で、3時間耐火性能を確保する部材断面構成を明らかにしたことは、耐火被覆厚さによって、同一建築物内で階によって部材断面寸法が大きく異なるというような設計計画上の制約を軽減できる成果である。更に、同じ被覆層厚さの中で、加熱面側の燃え止まり層の難燃薬剤量を低減できる見通しが立ったことで、更なる部材重量の軽量化や、建築計画上の納まりやコストによって建物全体での柱・梁の断面が選択可能となる設計手法の確立に寄与すると考える。

研究成果の概要(英文)：Regarding the relationship between the fire resistance performance necessary for building a high-rise building entirely in wood and the cross-sectional dimensions of members, the following results were obtained for wooden structural members using flame-retardant treated wood as a barrier layer.(1) A cross-sectional structure that ensures fire resistance performance for 3 hours, which enables construction of 15 stories or more, was clarified.(2) It was clarified that the depth of charring can be reduced by making the lamina direction of the barrier layer the direction in which lamina shrinkage and cracking do not easily occur and by using flame-retardant treated wood equivalent to noncombustible materials for the barrier layer.(3) It was clarified that the effect of reducing the charring depth by increasing the amount of flame retardant agent is greater during cooling than during heating, and it can be one of the methods that contributes to the weight reduction of the coating layer.

研究分野：建築学

キーワード：高層木造 火災 燃え止まり 材積 軽量化 3時間耐火 耐火構造

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

大規模・中高層木造は、脱炭素社会の実現や森林資源活用の観点から、近年、世界的に注目されている。加えて、RC造や鉄骨造などの他の構造部材と比べて、部材重量が軽い木造を高層利用できれば、軟弱地盤上や既存建築物の上部に高層化して、限られた敷地を有効利用できるなど、高層化による建築・都市的利点は大きいだろう。一方で、高層木造では、長時間の加熱に耐える高度な耐火性能が要求される。

木質耐火構造部材に関する既往研究<sup>1)</sup>等では、1、2時間耐火性能を確保する部材の設計方法の研究や耐火認定部材が開発されつつあるが、15階建て以上が建築可能となる3時間耐火性能に関する知見は少ない。

また、一般に3時間と耐火時間が長時間化した場合、その部材仕様の開発は、力学的に必要な荷重支持部を火災から保護する被覆層を、耐火時間に伴って厚く設計して耐火性能を確保する1、2時間耐火構造の延長上に留まっており、その部材断面は肥大化の一途を辿っている、このような従来の方法で高層木造建築を成立させようとする場合、①自重が重くなり、構造部材の断面寸法をさらに肥大させるといった構造的悪循環、②断面の肥大化により可燃物が多くなることから、耐火上不利に働くという防耐火的悪循環、③一棟の建物内で階によって、要求される耐火時間が異なるため、部材断面寸法が階によって大きく異なるなど建築計画上の制約が生じるという課題がある。

### 2. 研究の目的

高層建築全体を木造で成立させるのに必要な耐火性能の高度化と、それに伴って肥大化する部材断面寸法の制御を両立させて、部材断面の構成や材料を、要求される耐火時間や建築計画、コストに合わせて多様な組み合わせが可能にすることを目的とする。

木質耐火部材では、力学的に必要な荷重支持部の周りに被覆層を設ける（図1）が、高層化に伴い長時間の火災加熱に耐える耐火性能が必要になる。要求耐火時間の長時間化に伴って、被覆層が厚くなり部材断面を支配するようになるが、部材断面寸法や重量を制御・縮小する手法が未開拓である。

そこで本研究では、部材内の適材適所で材料等を変化させることで、部材断面の過大化や、階によって断面が大きく異なるなどの制約が生じないようにし、鉄骨造等で培われてきた建築計画手法が生かせるような木造設計手法を提示したい。

具体的には、既往研究<sup>1)</sup>で2時間耐火仕様の性能を確認している被覆層厚さ程度で、3時間耐火性能を確保できる部材構成を検討した。

### 3. 研究の方法

研究の内容は、実験の内容・分析により、以下の3つに分けて実施した。

#### (1) 1次元加熱による3時間耐火性能を有する木質耐火構造部材の把握

木造梁の側部を模した小型試験体を用いて、1次元の耐火加熱による3時間耐火性能を確保する被覆層の構成を検討した。燃え止まり層のラミナ方向や薬剤量をパラメータとした試験体を用意し、炭化深さに与える影響を明らかにした。

#### (2) 実大梁の耐火加熱試験による隅角部・底部の燃焼性状と燃え止まり層の性能の関係の把握

梁部材のうち、加熱性状の違いから弱点となりやすい底部及び隅角部について、実大梁の非載荷耐火加熱実験から、各部の燃焼性状と燃え止まり層の性能の関係を明らかにした。

#### (3) 燃え止まり層厚さ縮小及び軽量化に向けた検討

木造梁側部を模した小型試験体を用いて、(1)で明らかにした3時間耐火性能を確保する被覆層厚さ及び被覆層の性能・重量が最小となる被覆層の構成を検討した。

### 4. 研究成果

研究成果を以下の3つに分けて記載する。

#### (1) 1次元加熱による3時間耐火性能を有する木質耐火構造部材の把握

##### (a) 燃え止まり層及び荷重支持部のラミナ方向が炭化進行に与える影響

従来、部材のラミナ接着方向については、部材の組み立て方法や施工者によって異なり統一されていないことや、ラミナ接着方向による燃焼性状の違いは明らかにされていなかった。そこで、ラミナ方向を表1のように、加熱面に平行方向、または直交方向とした試験体を用意し、3時間耐火加熱を行い、炉内で21時間放冷した。ラミナ方向を加熱面に直交とした場合、平行とした場合に比べて25mm以上炭化深さが大きくなった。これは、ラミナ方向が加熱面に直交とすると、加熱時にラミナの収縮が試験体の

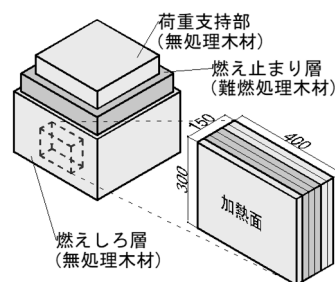


図1 研究対象とする木質耐火構造部材と小型試験体

深さ方向に起こりやすく、深い亀裂が発生したことにより、炭化深さも大きくなったと考えられる。ラミナ方向の違いは、従来の1、2時間耐火加熱よりも加熱時間が長時間化したことにより、ラミナの収縮や亀裂の程度が大きくなり、炭化深さにも大きな影響したと考えられる。

以上から、加熱面に対して直交方向に短い面をラミナ接着面とすれば、ラミナ収縮や亀裂によって炭化深さの増大を抑制できることを明らかにした(表1)。

表1 小型試験における3時間加熱後炉内で21時間放冷後の炭化性状と炭化深さ及び炭化速度(ラミナ方向の違い)

試験体	荷重支持部	薬剤固定量 [kg/m <sup>3</sup> ]		燃え止まり層厚さ [mm]	ラミナ方向	含水率 ※2 [%]	試験体断面図		炭化性状(脱炉後)	脱炉時の赤熱燃焼の有無	炭化深さ※3 [mm]				炭化速度 [mm/分]	
		目標	平均※1				ラミナ内数値: 溶脱法により計測したラミナ毎の薬剤固定量 [kg/m <sup>3</sup> ]				加熱開始からの経過時間		加熱開始から			
											1時間	2時間	3時間	脱炉時	1~2時間	2~3時間
K180-125	カラマツ	154.2	125	11.9	加熱面に平行			無し	38	60	83	115	0.37	0.38		
S180-150	スギ	130.9	150	12.4	加熱面に直交			無し	44	70	103	141	0.43	0.55		

(b) 燃え止まり層の難燃薬剤量が炭化進行に与える影響

木造梁の側部を模した小型試験体(加熱面 400×300mm)を用いて、3時間耐火性能を確保する被覆層の構成について、燃え止まり層に用いた難燃薬剤量ごと(薬剤注入量 300kg/m<sup>3</sup>、180kg/m<sup>3</sup>)にその必要厚さを明らかにした。ラミナの積層方向を加熱面と平行とした場合、燃え止まり層の薬剤量を 180kg/m<sup>3</sup> から 300kg/m<sup>3</sup> に増量すると、20mm 程度炭化深さが抑制されることを明らかにした。これより、薬剤量によって木質耐火構造部材の材積を抑制できる見通しが立った。また、図2の内部温度推移(特に、加熱面から深さ 75mm~105mm 付近)から、薬剤固定量の違いによる温度抑制効果は、加熱中よりも放冷中に顕著に表れることが示唆された。

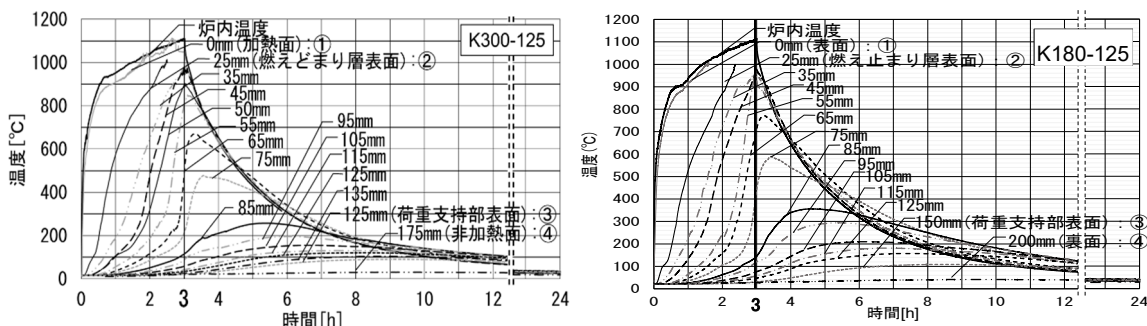


図2 小型加熱実験 内部温度推移(左から、薬剤注入量を 300kg/m<sup>3</sup>、180kg/m<sup>3</sup>とした場合)

(2) 実大梁の耐火加熱試験による隅角部・底部の燃焼性状と燃え止まり層の性能の関係の把握

3時間耐火性能を確保する実大梁部材における部材構成の把握と、2方向からの加熱や炭化層が脱落しやすいことから、弱点となりやすい隅角部及び底部における燃焼性状と燃え止まり層の難燃薬剤量(薬剤注入量 300kg/m<sup>3</sup>、180kg/m<sup>3</sup>)の関係を把握するために、実大梁の非載荷耐火加熱試験を行った。

側部及び底部については、薬剤量が炭化深さに与える影響は小さかったが、隅角部は、燃え止まり層の薬剤量を 180kg/m<sup>3</sup> から 300kg/m<sup>3</sup> に増量すると、10~20mm 程度炭化深さが抑制された。

これにより、薬剤量の増量は隅角部に関しても有効であることが明らかになった。

表2 実大梁耐火加熱試験における3時間加熱後21時間放冷後の炭化性状

試験体	FK300	FK180
目標薬剤注入量	300kg/m <sup>3</sup>	180kg/m <sup>3</sup>
平均薬剤固定量※1	270.3kg/m <sup>3</sup>	153.2kg/m <sup>3</sup>
炭化状況(脱炉時)		
燃え止まり判定※2	○	○

※1溶脱法<sup>2)</sup>により、ラミナ単位で計測した値の平均値。  
 ※2○:試験終了後、赤熱燃焼が停止、×:試験終了後、赤熱燃焼が継続。

(3) 燃え止まり層厚さ縮小及び軽量化に向けた検討

(1)の実験同様、木造梁の側部を模した小型試験体を用いて、3時間耐火性能を確保する被覆層の構成について、燃え止まり層厚さの縮小及び軽量化を目標に、耐火加熱実験を実施した。表3より、燃え止まり層の薬剤注入量を $300\text{kg/m}^3$ とした場合、炭化深さは $100\text{mm}$ となり、2時間耐火仕様と同程度(燃えしろ層+燃え止まり層厚さ $100\text{mm}$ )の被覆層厚さで3時間耐火性能を確保できる可能性が示唆された。ただし、荷重支持部表面にあたる深さ $100\text{mm}$ で、力学的性能の低下が想定される $200^\circ\text{C}$ に達した。よって、実際の柱・梁部材の検討では、荷重支持部への入熱の影響を抑える更なる検討が必要といえる。

燃え止まり層浅部を薬剤量低減した試験体(K180-50/300-25)と、燃え止まり層すべて薬剤量を $300\text{kg/m}^3$ とした試験体(K300-75)を比較すると、炭化深さはそれぞれ $103\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ で、その差は $3\text{mm}$ に留まった。薬剤量低減したK180-50/300-25では、表3より燃え止まり層浅部の薬剤固定量減少により加熱中の炭化深さは増した一方、放冷中の炭化はK300-75と比べ $9\text{mm}$ 抑制された。これは、燃え止まり層浅部の固定量が増えると表面に形成される炭化層の熱容量が増え放冷中の熱源となり、燃え止まり層深部における炭化抑制が妨げられる可能性が考えられる。以上より、燃え止まり層浅部の薬剤量低減は、放冷中に燃え止まり層深部における赤熱燃焼の進行を抑制できる可能性があり、被覆層の軽量化に寄与する手法の一つとなり得ることを明らかにした。

表3 小型試験における3時間加熱後炉内で21時間放冷後の炭化性状と炭化深さ及び炭化速度(燃え止まり層縮小・軽量化)

試験体	加熱時間	燃えしろ層厚さ [mm]	燃え止まり層		高重支持部	含水率 [%]	試験体断面図 (O:温度測定位置) (ラミナ内数値:溶脱法による薬剤固定量[ $\text{kg/m}^3$ ])	放冷終了後の炭化状況 (上端から100mmの断面)	赤熱の継続	炭化深さ [mm]					炭化速度 [mm/min]	
			薬剤量 [ $\text{kg/m}^3$ ]	注入						加熱開始からの経過時間					1-2h	2-3h
			※1 平均	※1 平均						1h	2h	3h	脱炉時	※4 放冷中	1-2h	2-3h
K300-75	3h	75	300	198	14.4	14.4			無	34	55	77	100	23	0.35	0.37
			50	180						124	38	62	89	103	14	0.41
K180-50/300-25	3h	25	300	197	12.3	12.3			無	38	62	89	103	14	0.41	0.44

※1 溶脱法でラミナ毎に計測した平均 ※2 全乾法でラミナ毎に計測した平均  
 ※3 K180-50/300-25のみ操作ミスにより9分超過した  
 ※4 脱炉時炭化深さと加熱開始後3時間の炭化深さの差  
 □:スギ □:薬剤注入量 $180\text{kg/m}^3$ 難燃処理スギ □:薬剤注入量 $300\text{kg/m}^3$ 難燃処理スギ □:カラマツ ■:炭化部  
 (丸菱油化製ノンネンW2-50) (丸菱油化製ノンネンW2-50)

<引用文献>

- 1) 齊吉大河他, 「2時間耐火性能を有する木質耐火構造梁における燃え止まり層の材積の最小化」日本建築学会環境系論文集第86巻第779号, pp.1-11, 2021.1
- 2) 上川大輔, 「難燃薬剤処理木材の溶脱法による薬剤固形成分量の計測手法に関する研究」木材保存 39-2, 2013.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水陽介
2. 発表標題 3時間耐火性能を担保する燃え止まり型木質耐火構造部材の断面構成の検討 - 木造高層化に向けた耐火性能の高度化と断面制御の両立に向けて -
3. 学会等名 日本建築学会関東支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 關根勝人
2. 発表標題 加熱される木材の熱分解が部材内部の昇温に与える影響-木材の1次元加熱実験と熱伝導計算の比較による検討-
3. 学会等名 日本建築学会関東支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三上翔也、赤間悠斗、渡辺康輝、伯耆原智世、松山賢、高瀬棕、上川大輔
2. 発表標題 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立（その4）3時間耐火性能を担保する実大木造梁の断面構成の検討 -実験結果・考察-
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤間悠斗、渡辺康輝、三上翔也、伯耆原智世、松山賢、高瀬棕、上川大輔
2. 発表標題 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立（その3）3時間耐火性能を担保する実大木造梁の断面構成の検討 -実験計画・方法-
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤間悠斗、清水陽介、伯耆原智世、高瀬椋、上川大輔
2. 発表標題 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立（その2）3時間耐火性能を確保した燃え止まり層断面構成の効率化
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伯耆原智世、清水陽介、赤間悠斗、高瀬椋、上川大輔
2. 発表標題 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立（その1）3時間耐火性能を確保する断面構成
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 關根勝人、種子田裕之、伯耆原智世、長谷見雄二、高瀬椋、上川大輔
2. 発表標題 加熱される木材の熱分解が部材内部の昇温に与える影響 -木材の1次元加熱実験と熱伝導計算の比較による検討-
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伯耆原智世、赤間悠斗、渡辺康輝、高瀬椋、上川大輔
2. 発表標題 燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層の縮小・軽量化 -3時間耐火性能を確保に向けた検討-
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺康輝、赤間悠斗、伯耆原智世、上川大輔、高瀬 椋
2. 発表標題 3時間耐火性能を確保する燃え止まり型木質耐火構造部材における 被覆層の縮小・軽量化に向けた基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺康輝、赤間悠斗、伯耆原智世、上川大輔、高瀬 椋
2. 発表標題 3時間耐火性能を確保する燃え止まり型木質耐火構造部材における 被覆層の縮小・軽量化に向けた基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会関東支部
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関