

高層木造建築物Port Plus®での避難安全設計

岸上昌史 山口純一

Evacuation Safety Design for High-rise Wooden Building Called Port Plus®

Masashi Kishiue Jun-ichi Yamaguchi

Abstract

The Obayashi Corporation constructed Port Plus®, a high-rise, pure wood fire-resistant building. In this paper, we present our approach to evacuation safety design in Port Plus. First, we summarize the basic policies for evacuation safety planning for each fire phase. Next, we summarize issues specific to wooden structures identified in developing the evacuation safety plan. The issues are as follows: (1) the combustion characteristics of the wooden interiors differ depending on the combustion part, (2) special shapes, such as sloping walls, have different combustion characteristics from general shapes, and (3) there is a risk of fire spreading to the upper floors via the exterior. The solutions to these issues and an outline of the verification experiments conducted are also presented in this paper. In the future, we plan to upgrade the evaluation of combustion properties to consider the combustion suppression effect of sprinklers.

概要

近年、建築物の木造化が促進されており、大林組でも高層純木造耐火建築物Port Plus®を建設した。本報では、Port Plusでの避難安全への取り組みを示す。まず、建物概要を示したのち、火災フェーズごとの避難安全計画の基本方針をまとめる。次に、避難安全計画を策定するうえで抽出した木造特有の課題を整理し、(1)木質内装では着火範囲によって燃焼性状が異なる点、(2)傾斜壁などの特殊な形状は燃焼性状が一般形状と異なる点、(3)外部を通じた上階延焼の危険性がある点を示した。また、これらの課題に対して施した対策および確認実験の概要を示した。今後は、スプリンクラーの燃焼抑制効果を考慮できるよう燃焼性状評価の高度化を図る。

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて、中高層建築物等での新たな木材需要の創出を目指し、都市等での「第二の森林」づくりが国の施策として促進されている^{例えは1)}。そのため、都市部を中心に鉄骨造あるいはRC造と適材適所に木造を組み合わせたハイブリッド構造建築物が急速に発展しつつある。こうした背景を受け、大林組では、より先進的な取り組みとして全ての地上構造部材(柱・梁・床・壁)を木材とした高層純木造耐火建築物Port Plus®を建設した。Fig. 1にパース、建築概要をまとめる。

木造建築物は、前述の脱炭素社会への貢献だけでなく、「木」独特のあたたかさや匂い、調湿等が在館者へ生理的・身体的な効果を与える可能性も示唆されている²⁾。その一方で、解決すべき課題も多い。例えば、コンクリートや鉄といった不燃材料と異なり燃えるため、火災時への配慮がより必要となる。

火災時に配慮すべき点としては2点あり、a)火災終了まで建築物が倒壊しない(構造部材の耐火性能)、b)煙に曝されずに在館者が安全に避難できる(避難安全性能)である。特に、高層建築物は全館避難に時間を要するため、避難安全性の確保のために避難経路となる階段室に

煙を入れないことに加えて、延焼防止対策が必要となる。なお、a)構造部材の耐火性能は、榎本ら³⁾が報告していることから、本論文ではb)避難安全性能を対象とする。

避難安全性能の確保には、火災を局所に留めるための



延べ面積	約3500m ²
階数	地下1階 地上11階
構造種別	地下：RC造 地上：純木造
用途	研修室 宿泊室

Fig. 1 パースおよび建築概要
Perspective and Architectural Overview

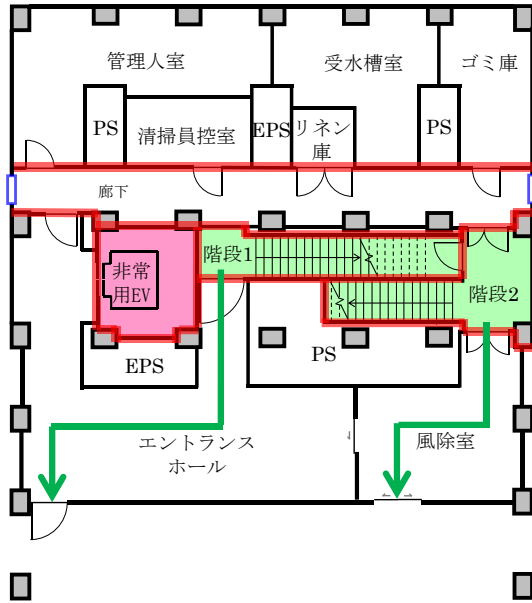
「区画計画」や、避難経路を適切に確保するための「避難計画」、「煙制御計画」への目配りが重要となる。これらは相互に結びついており、かつ建築条件（用途や立地等）により様々で共通解がない。しかし、実建物の設計を通して木造建築物特有の避難安全上の課題を把握し、どのような対策を施したかを整理することは、今後の高層木造建築物の避難安全設計を行ううえでも有用である。よって、本論文では高層純木造耐火建築物であるPort Plusでの避難安全計画への取り組みをまとめる。まず、建

物概要を示したのち、火災フェーズごとに整理した避難安全計画の基本方針をまとめる。次に、Port Plusでの避難安全計画を策定するうえで抽出した木造建築物全般にかかわる共通課題を示し、Port Plusで施した対策の概要を示す。なお、4章で後述する課題はハイブリッド構造を含む木造建築物を計画するには常に検討が必要になる。また、S造やRC造でも内装仕上げを木現しとする場合には、4.1節および4.2節に示す内容は有用と考えられる。

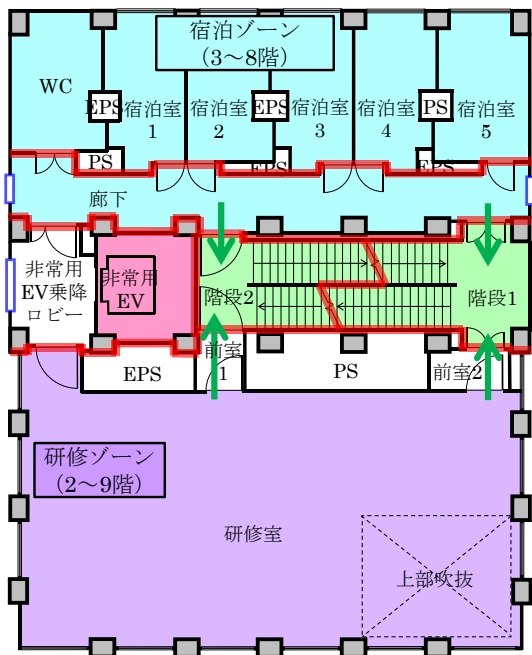
2. PortPlusの建物概要

2.1 建物構成

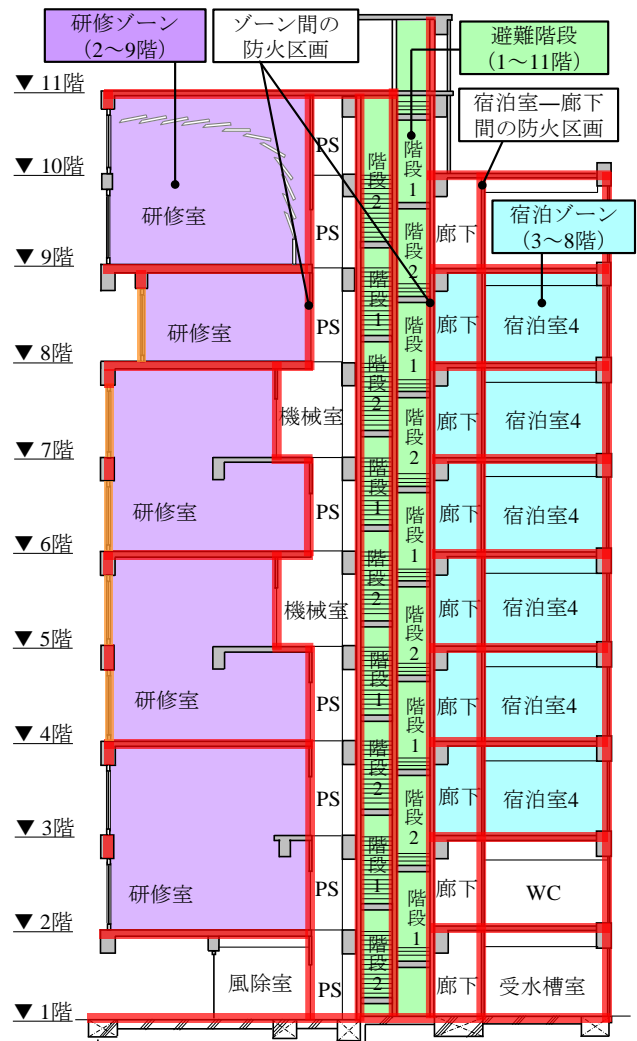
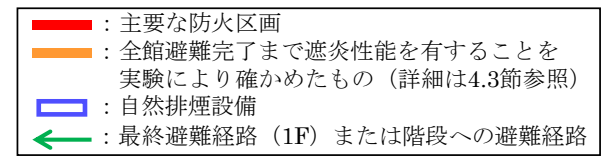
Fig. 2に1階および基準階（4階）の平面図、断面図を示す。本建物は、地下1階・地上11階、延床面積は約3500 m²



(a)平面図 (1F)



(b)平面図 (4F)



(c)断面図 (地上部分)

Fig. 2 平面図と断面図
Floor Plan and Cross-Sectional Plan

の高層建築物である。階段は建物中央に2か所計画し、避難階は1階である。

2.2 用途・収容人数

用途は大林組の研修所であり、Table 1に示すとおり各階の収容人数は10～60人、合計人数は290人である。

1階にはエントランスホールおよび管理入室、2～9階の南側は研修室（以降、研修ゾーン）、3～8階の北側には宿泊室・WC等（以降、宿泊ゾーン）を計画した。Photo 1に研修室、Photo 2に宿泊室のパスを示す。2～7階の研修室はそれぞれ2層1室の吹抜空間とした。9階の研修室はPhoto 3に示すとおり10階に床がない高天井の空間とした。宿泊室は、すべて1人部屋で3～8階の各階に5～6室ずつ計32室計画した。

2.3 構造部材・内装仕上げ

構造部材は、耐火構造の大臣認定を取得した仕様とした。なお、柱と梁は、耐火被覆材の上に不燃処理されていない木材（表面材）が張られた仕様で認定を取得している。

内装仕上げは、Table 2に示すとおり居室の壁は不燃処理されていない木材、天井は準不燃材料とした。廊下および前室は、天井・壁ともに準不燃材料とした。なお、9階の研修室には、Photo 3に示すとおり不燃処理されていない有孔のCLTが壁の一面および天井に設置された特殊な形状の内装とした。

2.4 避難安全検証法（ルートC）の採用

前述のとおり建築物の避難安全設計では「区画計画」、「避難計画」、「煙制御計画」が重要であるため、建築基準法では防火区画や避難階段の幅、歩行距離、排煙設備や内装制限等が具体的に定められている（ルートA。仕様規定ともいう）。

一方で、工学的手法により避難安全性能を有することを確認すれば（避難安全検証法という）、Table 3に示す避難関係規定の一部の適用を除外できる（ルートB又はC。性能規定ともいう）。これにより、実態に即した合理的な設計が可能になる。なお、避難安全検証法にはTable 3に示すとおり当該防火区画から避難できるかを確認する区画避難検証、当該階から避難できるかを確認する階



Photo 1 研修室
Seminar Room

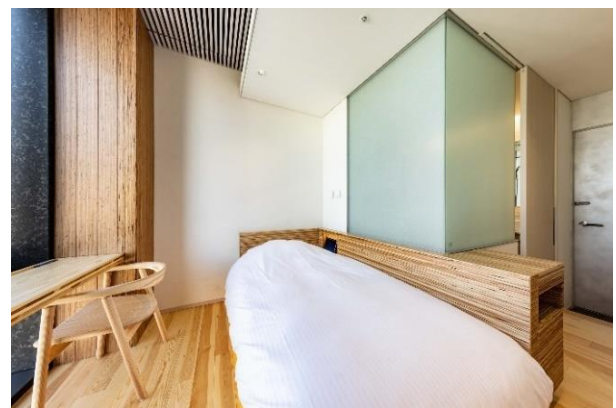


Photo 2 宿泊室
Guest Room



Photo 3 研修室 (9F)
Seminar Room (9th Floor)

Table 1 収容人数

階	主要室		用途	在館者	
				収容人数	合計
9	研修室	ラウンジ	研修 宿泊	60人	290人
8	研修室	宿泊室		25人	
7	研修室	宿泊室		25人	
6	研修室	宿泊室		25人	
5	研修室	宿泊室		25人	
4	研修室	宿泊室		40人	
3	研修室	宿泊室	展示 宿泊	40人	
2	研修室	倉庫		40人	
1	エントランスホール・管理入室		—	10人	

Table 2 内装仕上げ

Interior Finishes		
居室/非居室	室名	内装仕上げ
居室	研修室	天井：準不燃材料※1 壁：不燃処理されていない木材
	宿泊室	
	ラウンジ/管理入室	
非居室	廊下・前室	天井：準不燃材料 壁：準不燃材料

※1：梁の表面は不燃処理されていない木材

Table 3 避難安全検証法の採用により適用を除外できる項目
Items that can be Exempted by Adopting the Evacuation Safety Verification Method

項目	条項	規定の概要	区画避難 (128条の6)	階避難 (129条)	全館避難 (129条の2)	
防火区画	第7項	高層区画			○	
	第112条 第11・12・13項	堅穴区画			○	
	第18項	異種用途区画			○	
避難施設	第119条	廊下の幅		○	○	
	第120条	直通階段までの歩行距離		○	○	
	第123条	第1項第1号	屋内避難階段の階段室の構造			○
		第1項第6号	屋内避難階段の階段室に通ずる出入口の構造			
		第2項第2号	屋外避難階段の階段室に通ずる出入口の構造			○
		第3項第1号	特別避難階段の付室等の設置		○	○
		第3項第2号	特別避難階段の階段室、付室の構造（排煙設備）		○	○
		第3項第3号	特別避難階段の階段室、付室の構造（耐火構造）			
	第124条	第3項第10号	特別避難階段の階段室、付室等に通ずる出入口の構造		○	
		第3項第12号	特別避難階段の付室等の面積		○	○
		第1項第1号	物販店舗の避難階段等の幅			○
屋外への出口	第125条	第1項第2号	物販店舗の避難階段への出入口の幅	○	○	
		第1項	階段から屋外への出口までの歩行距離			○
排煙設備	第126条の2	第3項	劇場等の屋外への出口の幅		○	
		第126条の3	排煙設備の設置	○	○	○
内装制限	第126条の3	第126条の3	排煙設備の構造	○	○	○
		第128条の5	特殊建築物の内装(第2, 6, 7項および階段に係る部分を除く)	○	○	○

○：適用を除外できる項目 ■：Port Plusで適用を除外した項目

避難検証，建物から避難できるかを確認する全館避難検証の3つがあり，適用除外できる項目が異なる。また，検証方法も告示で定められた計算式を用いるルートB1・B2と建物毎に検証方法を含めた大臣認定を取得するルートCがある。Port PlusではルートCによる全館避難検証により避難関連規定の一部（詳細はTable 3）を適用除外した。

3. 避難安全計画の基本方針

Table 4は出火以降の各フェーズと燃焼・煙・避難性状を対応させたものである。建物火災は時間的に進展するため，避難安全計画も時間軸を踏まえた各フェーズに応じて「区画計画」，「煙制御計画」および「避難計画」を策定する必要がある。以降では，時間軸を踏まえた各フェーズに応じてPort Plusで施した対策をまとめる。

3.1 フェーズ1 出火・初期火災拡大

3.1.1 フェーズの概要 単一の可燃物が熱分解を起し，火炎が生じた状態を出火と定義する。出火直後は可燃物表面に沿って火炎が広がるが，火炎が大きくなると，他の可燃物へ接触し，周辺の可燃物が燃焼する。これを初期火災と呼ぶ。

3.1.2 本建物の避難安全計画 厨房や喫煙室といった裸火を使用する室は計画しないこととした。また，宿泊室も含め全館禁煙とした。初期消火対策として，煙感知器や消火器，スプリンクラー設備を設置した。

3.2 フェーズ2 フラッシュオーバー

3.2.1 フェーズの概要 初期火災が進み，室内の燃焼が激しくなると，室上部に高温の煙層が形成される。

当該煙層は，時間進展に伴い厚さを増すとともに温度が上昇してゆき，室内の可燃物の着火温度に近づくと次々に可燃物が燃焼し，火炎が一気に室全体に拡大する。この現象はフラッシュオーバー（F.O.）と呼ばれ，当該室在館者の生命に危険がおよぶ。また，室の開口を通じて隣接する室への漏煙も始まり，煙の拡散範囲が拡大する。こうした事象を踏まえて，建築基準法ではF.O.に至るまでの時間を遅らせるための対策として，①煙を排出し，煙層の温度上昇を遅延させる（排煙設備の設置），②高温になりやすい居室の天井や壁の内装材を不燃化する（内装制限）等が規定されている。

3.2.2 本建物の避難安全計画 F.O.が発生するまでに出火室の避難を完了することで，①排煙設備の設置や②内装制限を緩和しても避難安全上問題ないことを確認した。その概要を以下に述べる。

(1) 区画計画 居室の柱・梁および壁の内装仕上げは不燃処理されていない木材である。そこで，燃焼プロセスを考慮した木質内装の燃焼性状評価法（詳細は4.1および4.2節参照）を構築し，避難安全性能を評価した。

(2) 避難計画 避難時間を短くするため居室の床面積は150m²以下，室の各部分から出口に至る歩行距離は15m以下に制限し，かつ過度な滞留が発生しないよう30m²を超える居室は複数の避難経路を確保した。また火災の気づきの遅れがないよう配慮し，居室内に間仕切り壁を設けない計画とした。

(3) 煙制御計画 研修室や宿泊室は，排煙設備を設けない計画とした。ただし，宿泊室は就寝用途であり，火災覚知の遅れによる逃げ遅れに備え，宿泊室前の廊下には自然排煙設備を設置した（Fig. 2参照）。

Table 4 各火災フェーズ
Each Fire Phase

フェーズ	(1)出火～初期火災	(2)初期火災～F.O.	(3)F.O.～隣接する室へ延焼	(4)建物全体への延焼	
図					
図	<p>□: 火災の影響がある範囲</p> <p>■: 本建物での計画コンセプト</p>	<p>フラッシュオーバー (F.O.) に至るまでに 出火室から避難完了</p>	<p>延焼するまえに 建物から避難完了</p>		
燃焼性状	出火室	<ul style="list-style-type: none"> 可燃物の一から出火 出火物周辺の可燃物が延焼 	<ul style="list-style-type: none"> 内装材が燃焼 室全体に火炎が拡大 	<ul style="list-style-type: none"> 室外へ火炎噴出 	同左
	出火室以外 (出火階)	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 出火室から噴出した火炎により延焼 	<ul style="list-style-type: none"> 徐々に延焼拡大
	出火室以外 (上階)	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 出火室から噴出した火炎により延焼 	<ul style="list-style-type: none"> 徐々に延焼拡大
煙性状	出火室	<ul style="list-style-type: none"> 天井に沿って同心円状に広がる 室上部に煙層 (二層化) 	<ul style="list-style-type: none"> 時間進展に伴い、煙層は温度上昇かつ降下 隣接室へ漏煙し、前室上部に煙層を形成 	<ul style="list-style-type: none"> 一様混合 (約800℃) 時間進展に伴い、煙層は温度上昇かつ降下 	同左
	出火室以外 (出火階)	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 出火室の直上階の室の上部に煙層形成 	<ul style="list-style-type: none"> 階段へ漏煙
	出火室以外 (上階)	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 建物全体が煙汚染
避難性状	出火室	<ul style="list-style-type: none"> 避難開始 	<ul style="list-style-type: none"> 出火室在館者の避難完了 【居室避難】 避難開始 	—	—
	出火室以外 (出火階)	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 当該階在館者の避難完了 【階避難】 	—
	出火室以外 (上階)	—	<ul style="list-style-type: none"> 避難開始 (※出火階より遅れる) 	<ul style="list-style-type: none"> 全館在館者避難完了 【全館避難】 	—

3.3 フェーズ3 延焼

3.3.1 フェーズの概要

F.O.以降、激しい加熱により破損した出火室の窓から、火炎等が噴出し、隣接する室や上階の室が延焼する。特に、上階への延焼は複数階での火災の同時発生を意味し、きわめて危険である。

3.3.2 本建物の避難安全計画 本建物では、隣接する室や上階へ延焼するまでに全館避難が完了するよう計画した。その概要を以下に述べる。

(1) 区画計画 水平方向の延焼防止対策として、Fig. 2 (c)に示すとおり建物の中央に設けた避難階段と非常用エレベーターの防火区画を利用して、研修ゾーンと宿泊ゾーンを二重の防火区画でゾーニングした。また、宿泊室前の廊下と宿泊室の間の壁は、火災覚知の失敗等による逃げ遅れに備え、防火区画とした。

鉛直方向の延焼防止対策として、Fig. 2 (c)に示すとおり研修室は2層ごと、その他の部分は階ごとに準耐火構造の壁または床および特定防火設備で区画し、上階延焼対策が必要な4～8階の外壁廻りの開口部 (延焼の恐れのある部分を除く) は全館避難が完了するまで遮炎性能を有することを実験で確認した仕様 (4.3節参照) とした。

(2) 避難計画 出火階のうち非出火室の在館者は出火エリアを経由せず避難できるよう、研修ゾーンと宿泊ゾーンでそれぞれ独立した階段までの避難経路を計画した。1階の最終避難経路は、火災の発生のおそれの少ない室で計画した。なお、本建物における全館避難時間は約15分であった。

(3) 煙制御計画 全館避難が完了するまでに階段内への煙の侵入防止を目的として、宿泊室前の廊下には自然排煙を設置した。研修室前の前室は無排煙としたが

扉を防火設備 (二号) とし、漏煙量を低減した。

4. 木造建築物特有の避難安全上の課題と対策

Port Plusでの避難安全計画を策定するうえで抽出された避難安全上の課題と対策をまとめる。

4.1 木質内装

4.1.1 課題の整理

木造建築物では、内装仕上げも木現し (以下、木質内装という) としていたというニーズが多い。室の壁や天井等の内装材料は、火災初期の燃え広がりに及ぼす影響が大きい。Fig. 3は、幅2.2m×奥行3.6m×高さ2mの室の壁2面と天井に厚さ12mmの合板を設置し、木質内装の燃焼性状を測定した結果⁴⁾である。同図に示すとおり壁に着火し、そののち天井が燃え始め、その後火炎が天井全体に拡がり、最終的にはフラッシュオーバーに至る。このように、内装材料が燃えやすいと、室内の延焼を助長し、望ましくない。そこで、建築基準法では、居室の壁 (1.2mより上の部分) と天井の仕上げを難燃材料とするよう規定されている (内装制限)。

4.1.2 対策

対策は以下の2つに大別される。

(1) 難燃処理 木質内装の防火性能を向上させ、難燃性能を確保する手法である。主にa)無機質材料等の表面に燃焼しても支障ないほどに薄い木を張る、b)木材に難燃剤を含浸させるの2通りの方法がある。現状よく用いられる方法であり、ルートAでの計画が可能だが、コスト増加や含浸させた難燃剤が表面に出る (白華現象) 等の意匠性の低下が懸念点である。

(2) 内装制限の緩和 避難安全検証法の適用によ

り内装制限の適用除外を図る方法である。

4.1.3 Port Plusの採用手法 木質内装であっても出火初期から急激に燃焼することはない、天井が燃焼し始めて以降に急激に燃焼するという燃焼プロセスに着目し、避難計画と絡めた独自の燃焼性状評価手法を構築した。そのうえで、評価手法も認定の対象となる避難安全検証ルートCにより避難安全性能を評価した。その概要を以下に述べる。

Fig. 3を燃焼範囲という点で分類すると、4つのステップに分類できる。

- ステップ1：出火（壁や天井は燃焼していない）
- ステップ2：壁に着火し、壁のみ燃焼。壁表面に沿い火炎が上方へ伝播する。区画上部に煙が蓄積する。
- ステップ3：天井も着火し、壁と天井の一部が燃焼。発熱速度・煙層温度が急増する。
- ステップ4：壁と天井全体が燃焼。燃焼が激しくなり最終的にフラッシュオーバーに至る。

このステップとFig. 3に示した燃焼性状の関係を踏まえると、木質内装は天井が燃焼し始めて以降に急激に燃焼するといえる。なお、空間容積や火源の発熱速度を変えた条件でも同様の傾向が報告されている⁵⁾。この知見は告示化されており、壁を木材、天井を準不燃材料とした場合は難燃材料に相当するとされる（告示第707号）。

本建物では、壁は木材、天井は準不燃材料だが、柱・梁は不燃処理されていない木材が表面材であり、上記告示には適合しない。しかし、Fig. 4に示すとおり梁に着火するまでの内装の燃焼性状は難燃材料相当とみなせると考えられる。そこで、梁に着火するまでに当該室からの避難を完了できるかを別途確認することで、当該室の内装の燃焼性状は難燃材料相当とみなして避難安全性能を評価した。なお、梁への着火条件の判定として、避難完了時に①火炎が梁下端に達しないか、②煙層温度が200℃以下であるか、を別途確認した。

4.2 特殊な形状の木質内装の燃焼性状評価

4.2.1 課題の抽出と対策 木質内装では、鉛直に設けた壁や水平に設けた天井（以下、一般形状という）と異なる形状（以下、特殊な形状という）の計画がある。その特殊な形状ゆえに燃焼性状がFig. 3に示したような一般形状の場合と異なる可能性が考えられる。そのため、特殊な形状については別途燃焼性状を把握する必要がある。現状、こうした特殊な形状の木質内装の燃焼性状を予測できる手法は確立されておらず、その都度実験にて燃焼性状を確認せざるを得ない。

4.2.2 Port Plusの採用手法 9階の研修室には壁の一面および天井に、不燃処理されていない有孔CLTがある角度を有して設置される（Photo 3）。そこで、傾斜の影響や孔を介した裏面側への火の廻りこみによる可燃面積の増加により、燃焼性状が激しくなることがないかを確認する必要がある。よって、実建物と同一の仕様で燃

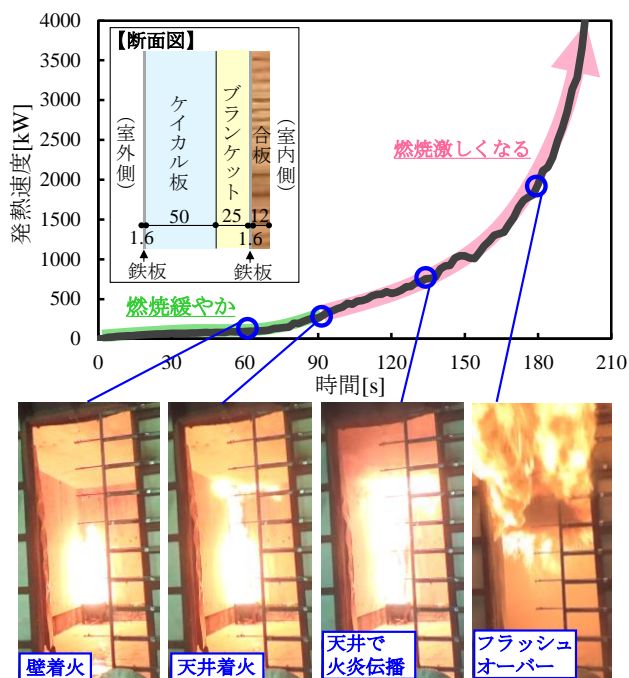


Fig. 3 木質内装の燃焼性状⁴⁾
Example of Combustion Properties

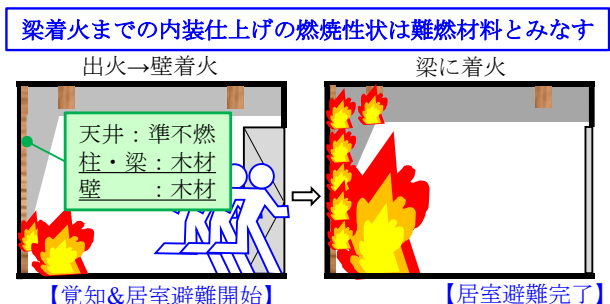


Fig. 4 本建物での評価手法
Valuation Method in Port Plus®

焼実験を実施し、その燃焼性状を確認した。

(1) 試験体の再現範囲 後述する避難安全性評価との関係を考慮して、本実験では、実建物の1段目と2段目について設置角度を含めて再現した。

(2) 実験概要 ルームコーナー試験装置（幅2.4m、奥行3.5m、天井高さ2.2m）を用いた。試験装置の平面図、断面図をFig. 5に示す。当該試験装置の壁の一面に、傾斜CLTの2段目上端が天井に面するよう設置し、燃焼性状を把握した。なお、天井には着火判定を目的として厚さ9mmの合板（密度0.6g/cm³）を設置した。

火源は0.3m角のガスバーナーを用い、試験体の中央でバーナーの1辺が試験体に面するよう設置した。なお、中央に設置した理由は、本建物の傾斜CLTが「設置面が1辺のみ」かつ「室の隅角には計画されない」という計画特性を鑑みたものである。

(3) 測定項目 火源の発熱速度 Q_f および火源の発熱速度と試験体の燃焼による発熱速度を合算した総発熱速度 Q_{all} を測定した。火源の発熱速度 Q_f は、マスフロー

メーターで測定したガス流量に理論発熱量を掛けて算出した。総発熱速度 Q_{all} は、試験装置の開口上部に設けた集煙フード内に設置した流量計、ガス分析計、熱電対の指示値を用いて酸素消費法により算出した。また、外部からビデオにて燃焼状況を撮影した。

(4) 試験体の仕様 Table 5に示すとおり、傾斜CLTの試験体は計4体とし、サイズは3200mm×1200mm×90mm、いずれも実建物で用いる塗装のうち可燃物量が多いウレタン塗装を施した。孔径は、実建物で採用する最大と最小の70mmと40mmの2条件とし、開孔率は実建物で採用する最大の5%とした。

(5) 試験方法 火源着火後は自由燃焼とし、噴出火炎が発生した段階で火源の燃焼を終了し、散水により

消火した。なお、通常のルームコーナー試験で用いられる火源の発熱速度 Q_f は600秒まで100kW一定、600秒以降は300kW一定であるが、100kWだと火炎が天井に達してしまい、CLT着火からの燃え広がり性状を把握できない。そこで、Fig. 6に示すとおり避難安全検証で用いる t^2 火源（係数は0.01）とし、150s以降は275kW一定とした。

(6) 実験結果 一例として、Photo 5に試験体No.1の代表時間の燃焼状況、Fig. 7(a)に火源の発熱速度 Q_f および総発熱速度 Q_{all} の時系列データを示す。ここで Q_{all} と Q_f の比較方法について述べる。前述のとおり Q_{all} は、 Q_f と試験体の燃焼の合算であるから、 Q_{all} と Q_f が等しい場合には試験体は燃焼していないことを意味する。 Q_{all} が Q_f より大きいと内装が燃焼していることを意味する。

Fig. 7(a)より、着火20秒までは Q_{all} と Q_f はほぼ同じであるが、それ以降は Q_f より Q_{all} が大きくなる結果となった。また、 Q_f が大きくなるにつれて Q_{all} も大きくなる傾向を示した。Photo 5に示すとおり、天井着火を目視で確認した2分34秒までのCLTの燃焼範囲は火炎近傍のみであり、局所的な燃焼であった。本試験体における2分34秒時点での煙層温度は約300°Cであった。なお、これらの傾向は他の試験体でも同様であった。

(7) 燃焼性状評価法の構築 時刻歴での内装燃焼評価を行うべく、(1)式に示す内装燃焼係数 k_m を導入した。

$$k_m = Q_{all}/Q_f \quad (1)$$

Q_{all} : 総発熱速度

Q_f : 火源の発熱速度

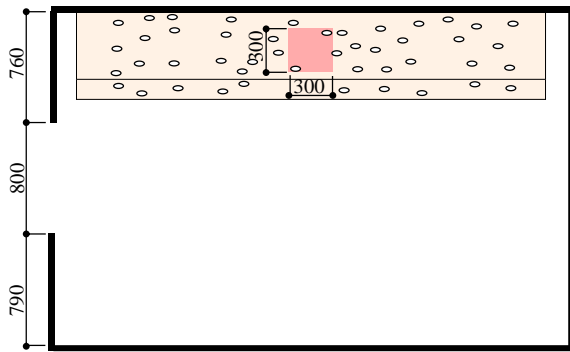
ここで、内装の発熱速度を Q_c とおくと、 Q_{all} は $Q_f + Q_c$ であるから、(1)式は(2)式に書き換えられる。

$$k_m = (Q_f + Q_c)/Q_f = 1 + Q_c/Q_f \quad (2)$$

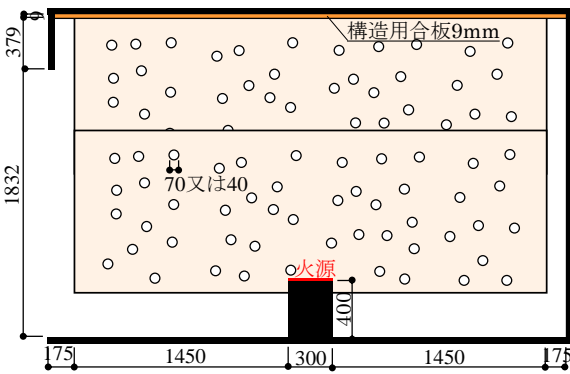
(2)式は、内装燃焼時の k_m は1より増加することおよび k_m

Table 5 試験体の仕様
Specimen of Specifications

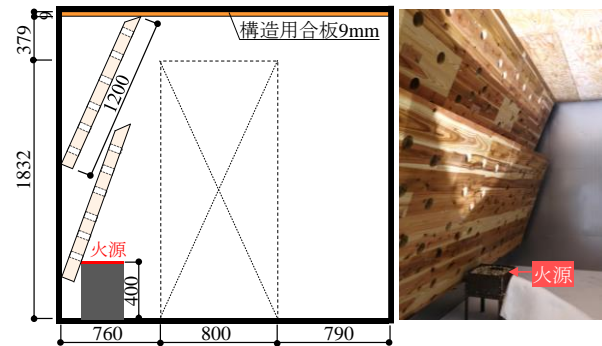
No.	サイズ [mm]	孔径 [mm]	開口率 [%]	密度 [kg/m ³]	内装燃焼係数 k_m [-]
1	3200×1200×90	70	5	417.8	2.31
2				404.9	2.58
3		40		412.1	2.31
4				408.9	2.47



(a)平面図



(b)断面図（長手方向）



(c)断面図（短手方向）および試験体設置外観

Fig. 5 試験装置図

Drawing of Test Equipment

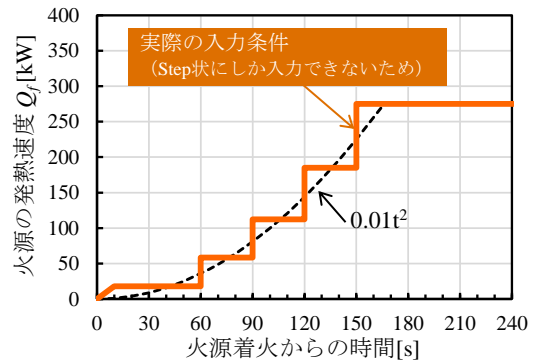


Fig. 6 火源の発熱速度 Q_f （入力条件）
Heating Release Rate of Fire Source

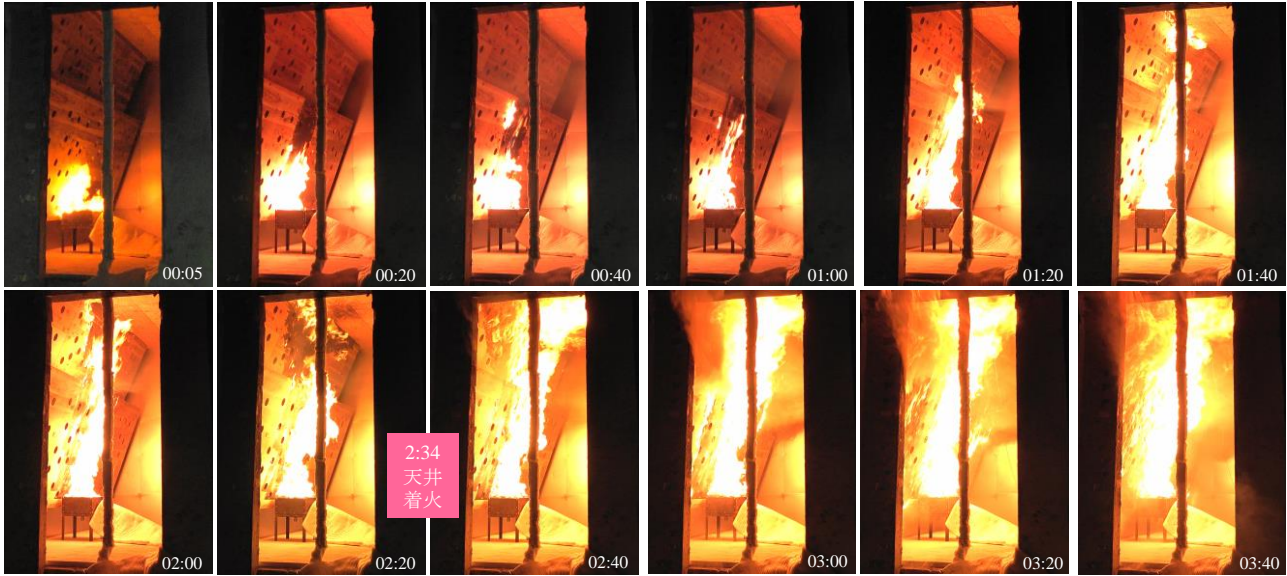


Photo 4 時系列での試験体の燃焼状況(No.1)
Combustion Status of the Specimen in Time Series

が大きいほど内装の燃焼が激しいことを意味する。

Fig. 7(b)に、試験体No. 1の k_m を示す。併せて、告示第510号に定められた内装仕上げを難燃材料とした場合に(2)式より算出される k_m (=3.32) も併せて示す。Fig. 7(b)より、CLT3段目に着火するまでの時間を対象とすると、 k_m は最大2.31であり、常に3.32を下回った。このとおり、任意の時刻までの燃焼性状を比較できる点が k_m の長所である。Table 5に各試験体の k_m も示すが、試験体No. 1とほぼ同様であり、本実験における k_m の最大は2.58であり、常に3.32を下回った。

(8) 本建物での評価手法 Fig. 8に示すとおり、火災がCLT3段目に着火するまでのフェーズでは難燃材料より燃焼性状が緩やかであることを確認できた。そこで、CLT3段目に着火するまでに当該室からの避難を完了できるかを別途確認することで、当該室出火時の内装の燃焼性状を難燃材料相当とみなして避難安全性を評価した。なお、評価時における火源の発熱速度 Q_f は告示第510号で定められた(3)式を用い、(3)式に k_m を乗じたものを総発熱速度 Q_{all} として扱った。

$$Q_f = 2.6 \times 10^{-6} \times q_l^{5/3} \times t^2 \quad (3)$$

q_l : 積載可燃物の可燃物密度

t : 時間

ところで、(3)式の q_l に研修室用途の値 ($q_l = 240\text{MJ}/\text{m}^2$) を代入すると t^2 の係数は0.0241となり、実験での Q_f の係数 (=0.01) と一致しない。しかし、(2)式で得られる k_m は Q_f が小さいほど大きくなるため、 Q_f が小さい条件で実施した実験で得られる k_m を用いて評価することは安全側の取り扱いである。この傾向は、同一の内装条件で火源の大きさのみを変更した実験からも確認できた。

4.3 上階延焼の防止

4.3.1 課題の抽出 Fig. 9に示すとおり、F. O.以降

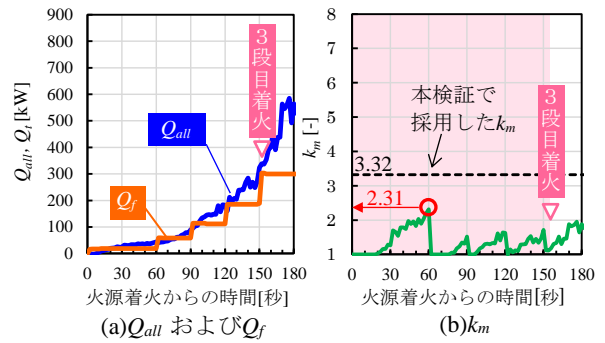


Fig. 7 実験結果 (No.1)
Experimental Results (No.1)

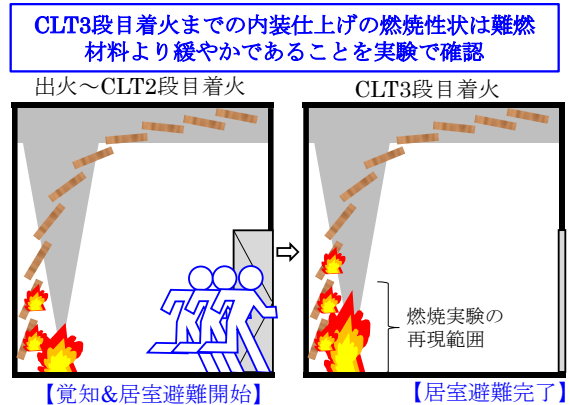


Fig. 8 本建物での評価手法
Valuation Method in Port Plus®

には火災室の窓が破損し、火炎や高温の熱気流が窓から噴出する。この噴出熱気流に上階の室の窓が曝され破損すると、上階へ火炎や高温の熱気流が侵入し、上階の木質内装に着火すると複数階での同時火災となる。

4.3.2 Port Plusの採用手法 複数階での同時火災

を防ぐために、Fig. 10に示すとおり上階延焼対策が必要となる4～8階の外壁に設けられたすべての窓について全館避難が完了するまでの15分の間、噴出気流により破損しない（遮炎性能を有する）ことを試験により確認した仕様とした。

4.3.3 遮炎試験 以下では、遮炎試験の概要を述べる。

(1) 試験体概要 Table 6に試験体概要をまとめる。窓仕様は全て複層ガラスである。Photo 5に示すとおりガラスの性能を確かめる基礎実験および実建物で採用する回転機構枠を再現した本実験の2つを実施した。なお、いずれの試験体も、本建物と同一のガラスとした。また、ガラスの内法サイズは、本建物で使用する寸法の最大（幅方向の最大、高さ方向の最大を兼ね備えたもの）、ガラス間の空気層の厚さは本建物での最大値とした。

(2) 試験方法 防耐火性能試験・業務方法書 遮炎・準遮炎性能試験方法⁶⁾に従い、実施した。加熱時間は最大20分とし、次のa)からc)に示す判定条件のうち1つでも不合格が出た場合は終了した。

- a)非加熱面への10秒を超える火炎の噴出がない
- b)非加熱面への10秒を超える発炎がない
- c)火炎が通る亀裂等の損傷および隙間を生じない

(3) 試験結果 基礎実験の結果をTable 6にまとめる。片側にLow-Eガラスを採用した試験体は、10分5秒で火炎が通る隙間が生じた。一方で、両側とも耐熱強化ガラスを採用した試験体は、20分の間火炎の噴出、発炎および隙間の発生はなかった。よって、回転枠機構再現実験では、両側とも耐熱強化ガラスとした。

Fig. 11に、回転機構枠を再現した試験体での代表時間の試験体状況と試験結果を示す。Fig. 11に示すとおり、18分50秒で枠下部に微小な隙間が生じたため、この時点で遮炎性能を失ったと判定した。なお、加熱は20分まで続けたが、枠下部の隙間以外を除いては火炎の噴出、発炎および隙間の発生はなかった。

(4) 本建物での評価手法 上階延焼防止対策として、本建物では18分50秒まで遮炎性能を有することを確認した仕様（両面とも耐熱強化ガラス）を4～8階の外壁廻りの開口部に採用した。

5. まとめ

本論文では、高層純木造耐火建築物であるPort Plusでの避難安全計画への取り組みをまとめた。まず、建物概

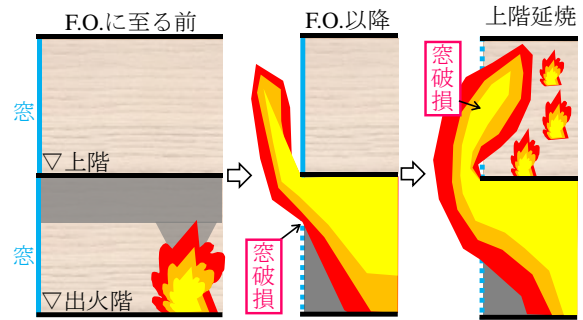


Fig. 9 上階延焼の要因

Factors that Cause Fire Spread to Upper Floors

外壁のすべての窓は、全館避難完了 (=15分) まで遮炎性能を有することを実験で確認した仕様とする

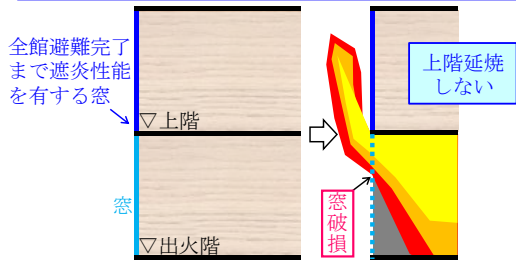


Fig. 10 本建物での対策手法

Methods of Countermeasures in Port Plus



(a)ガラス性能評価



(b)回転機構再現試験体

Photo 5 試験体外観

Appearance of Test Piece

Table 6 試験体の仕様
Specimen of Specifications

実験目的	枠	枠形状	ガラス				セッティングブロック	シーリング材	試験結果			
			屋外側	空気層	屋内側	内法寸法			かかり代	遮炎性能保有時間	判定(≧15分)	
基礎実験	ガラスの性能評価	鋼材t9	はめ殺し	Low-E 6mm	12mm	耐熱強化 8mm	W1700×H2500	13mm	エチレンプロピレンゴム	シリコン系(防火戸用指定)	10分5秒	NG
				耐熱強化 8mm			W900×H1850				20分	OK
本実験	回転機構枠をも再現	鋼材t2.3	回転戸								18分50秒	OK

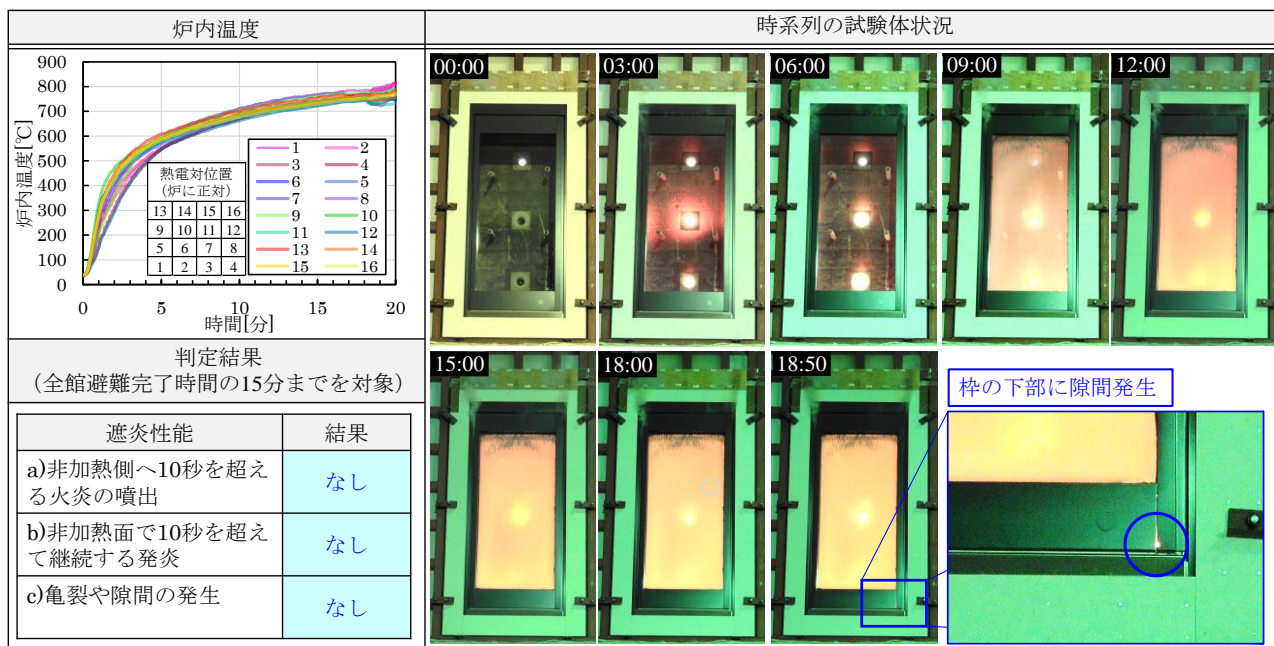


Fig. 11 遮炎試験結果 (回転機構枠を再現した試験体)

Flame-Shielding Test Results (Test Specimen Reproducing the Rotation Mechanism)

要を示したのち、火災フェーズごとに避難安全計画の基本方針を整理した。次に、Port Plusでの避難安全計画を策定するうえで抽出した課題を示し、Port Plusで施した対策の概要を示した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 木造建築物では、木質内装としたいというニーズがある。また、柱や梁の耐火構造の大臣認定仕様において仕上げを木現しとする場合がある。これらの計画を実現する場合には、木質内装への対策が必要となる。
- 2) 木質内装は、出火直後から激しく燃焼するわけではなく、壁への着火直後は緩やかで、天井に着火したのち激しく燃焼する。この特性を踏まえて、Port Plusでは燃焼ステップに応じた内装燃焼評価方法を導入し、避難安全性能を評価した。
- 3) 特殊な形状の木質内装の燃焼性状を把握するには、実大実験に依らざるを得ない。Port Plusでは、傾斜した有孔のCLTの燃焼実験を実施するとともに、実験結果を評価の際に室用途に合わせて安全側に読み替えるための評価として内装燃焼係数という考えを新たに導入して、避難安全性能を評価した。
- 4) 木造建築物では、外部を経由した上階延焼の防止対策が必要となる。Port Plusでは、上階延焼対策が必要となる4~8階の外壁廻りのすべての窓を、全館避難が完了するまでの間、遮炎性能を確認できた仕様とした。

なお、4章で述べた課題はハイブリッド構造を含む木造建築物を計画する際には常に検討が必要になると考えら

れる。また、S造やRC造でも内装仕上げを木現しとする場合には、4.1節および4.2節に示す内容は検討が必要になる。

今後は、スプリンクラーによる燃焼抑制効果や排煙設備による煙層温度低減効果を考慮できるよう木質内装燃焼性状評価の高度化を図る。

参考文献

- 1) 林野庁林政部企画課，“森林・林業基本計画”，林野庁，2021
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/>, (参照 2022-07-05)
- 2) 林野庁林政部木材産業課，“木材・木造建築物関係のハンドブック”，林野庁，2017
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/mokusan/attach/pdf/handbook-24.pdf>, (参照 2022-07-05)
- 3) 榎本，他，“都市木造の実現に向けた構造技術の開発”，大林組技術研究所所報 No. 85 2021
- 4) 一般財団法人日本建築防災協会：令和2年度建築基準整備促進事業 F19 内装制限及び排煙設備の設置基準の合理化に係る検討 報告書，pp. 52-53, 2021.3
- 5) 市原，他：木質内装材料の燃焼発熱性状に関する研究—大規模空間における火災成長率の実験的把握—，日本建築学会学術講演集(東海)，pp. 319-322, 2012.9
- 6) 日本建築総合試験所，“防耐火性能試験・評価業務方法書”，日本建築総合試験所，2022