

天井付近に設けた木製ルーバーの燃焼性状評価および燃焼抑制手法の開発

岸上 昌史 山口 純一

Evaluation of Combustibility and Development of Combustion Suppression Methods for Wooden Louvers Installed Below Ceilings

Masashi Kishiue Jun-ichi Yamaguchi

Abstract

With the increase in the use of wood in buildings, there is a desire to install combustible wooden louvers below room ceilings. In the event of a fire, there is a concern that the combustion of such louvers may affect the safe evacuation of occupants. Therefore, this study conducts combustion experiments on wooden louvers. First, we summarized the current issues related to the evaluation method of combustion properties. Next, combustion experiments with two different sizes were conducted to understand the combustion mechanism. Finally, a simple countermeasure was devised to mitigate the combustion properties in the early stages of a fire, and its performance was confirmed.

概要

近年の建築物の木質化促進に伴い、部屋の天井付近に不燃処理を施さない木製ルーバーを設置したいというニーズがある。火災時には、当該ルーバーの燃焼が在館者の避難安全に影響を与えることが懸念されるため、本報では燃焼実験を実施した。まず、不燃処理を施さない木製ルーバーの燃焼評価に係る課題を整理した。次に、火災初期の燃焼メカニズムを把握した。また、2つのサイズの異なる燃焼実験を実施し、木製ルーバーの寸法（幅および厚さ）、ピッチ、ふところ寸法が燃焼性状に与える影響を把握した。最後に、火災初期（避難中）における木製ルーバーの燃焼を抑制する簡便な対策を考案し、実証実験を実施した。今後は、スプリンクラー設備による燃焼抑制効果等について検討する予定である。

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて、国の施策として建築物における「木材」の利用が促進されており、大林組でも高層純木造耐火建築物「Port Plus®」を建設した^{1),2)}。こうした木造建築物では、内装仕上げを木現し（以下、木質内装）としたいというニーズがある。また、木造だけでなくRC造や鉄骨造においても木質内装を採用したいというニーズは年々増加しつつある。

しかしながら、室の壁や天井の内装仕上げは火災初期の燃え広がり及び影響が大きく、在館者の避難安全上の観点から対策が必要となる場合がある。特に天井面の木質内装は火災時に急速かつ広範囲に燃え広がるおそれがある。そのため、薬剤の含浸や基材となる木材の外周部に特殊なアルミニウム箔複合シートを貼る³⁾等の対策により難燃以上の防火性能を確保する対策（以下、不燃処理）や、壁は木質内装とするが天井は準不燃材料とする対策等が採られる。

他方、近年ではFig. 1に示すとおり壁や天井の内装仕上げは準不燃材料としたうえで、オフィスや食堂、エントランス等の天井付近に不燃処理を施していない木製ルーバー（以下、天井木ルーバーという）を設置したいというニーズがある。天井木ルーバーは前述のとおり急速かつ広範囲に延焼するおそれがあるが、その燃焼性状は明

らかではない。また、不燃処理よりも簡便な対策にて急速な燃焼拡大を抑制できれば有用と考えられる。

以上を踏まえて、本研究では天井木ルーバーの燃焼性状を把握すべく、燃焼実験を実施した。さらに、火災初期の天井木ルーバーの燃焼を抑制する簡便な対策を考案し、その性能を確認した。

2. 天井木ルーバーの燃焼評価に係る課題

まず、天井木ルーバーの燃焼評価に係る課題と本論文での取り組みについて整理する。

2.1 内装制限への対応

現行の建築基準法では、一定規模以上の建築物につい

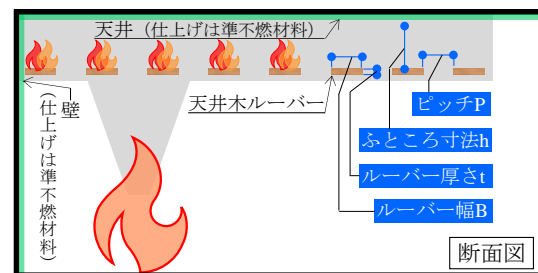


Fig. 1 天井木ルーバーの燃焼に影響を及ぼす変数
Variables Affecting the Combustion of Louvers

て「壁（床から1.2mより上の部分）」と「天井」を対象として、内装仕上げを「難燃材料」等とすることが定められている（内装制限）。難燃材料とは、通常火災による加熱に対して、加熱開始から5分の間、燃焼を規定値以下に抑えること、防火上有害な変形・溶融・亀裂等の損傷を生じないこと、避難上有害な煙・ガスを発生させないこと、という3つの要件を満足する建築材料を指す。なお、建築基準法では難燃材料の他に、準不燃材料と不燃材料という分類が設けられており、いずれも満足すべき要件は同じだが、必要性能保有時間（準不燃材料は10分、不燃材料は20分）が異なる。以下では主に難燃材料を取り上げる。

難燃材料は、①Fig. 2に示す例示仕様（建設省告示第1402号）、②内装材の燃焼性能試験^{例えは4}（詳細は2.2節）に合格して国土交通大臣の認定を受けた仕様、または③天井の内装仕上げを準不燃材料、壁の内装仕上げを木材としたもの（難燃材料でした内装の仕上げに準ずる仕上げ。国交省告示第707号）を指す。③は木質内装が出火初期から激しく燃焼するのではなく、天井が燃焼し始めた以降に急激に燃焼するという性質に着目したものであり、天井面の木質内装利用を厳しく制限している。なお、

現状、天井木ルーバーが内装制限の対象かどうかは建築主事の判断による。そのため、Fig. 2に示す条件分岐が発生し、内装制限の対象でない場合には天井木ルーバーを用いることができる。一方、対象となる場合には、不燃処理を施していない木材は例示仕様（仕様①）に合致せず、天井近傍設置という特性により仕様③にも合致しないため、仕様②の燃焼試験に合格する必要がある。しかし、2.2節で後述するとおり現行の燃焼性能試験ではルーバーの燃焼を評価できない。

そのため、避難安全検証により当該建物が十分な避難安全性能を有することを確認して、内装制限の適用を除外することが必要となる^{例えは5}。なお、避難安全検証を適用しても廊下や階段の内装制限の適用除外はできない点には注意が必要である。

避難安全検証には、告示で定められた計算式を用いるルートBと、検証方法を含めた大臣認定を建物毎に取得するルートCがある。（建築基準法の規定を適用除外しない場合をルートAという）。ルートBにはB1とB2という2つの手法があるが、両者ともそれぞれ内装仕上げのグレードが定められており、天井木ルーバーは天井全面を

木質内装とした場合と同じ扱いになり検証成立が難しい。そのため、ルートCの採用が現実的である。

天井木ルーバーが内装制限の対象となるかは法的な解釈の問題であるため、本論文で解決できる内容とは言い難い。しかし、仕様③に示したとおり天井面の木質内装利用が制限される現状を鑑みても、たとえ自主的でも天井木ルーバーの燃焼性状を把握したうえで建物の避難安全計画を策定することは、非常に有用と考えられる。

2.2 燃焼性状の評価方法

Table 1に、内装材の燃焼性状を評価する3つの代表的な試験方法の概要を示す。発熱性試験は、別名コーンカロリメーター試験とも呼ばれ、100mm角で厚さ50mm以下の試験体に対して外部着火源と放射熱を当てた状態で着火燃焼させ、その燃焼性状を評価する。模型箱試験は、約1/3スケールの室内模型の側面および天井面全体にわたって隙間なく試験体を設置し、模型内部で火源を燃やした時の燃焼性状を評価する。ルームコーナー試験は実大の室内模型の内部に試験体を設置し、内部で火源を燃やした時の燃焼性状を評価する。国内では発熱性試験および模型箱試験が内装材の燃焼性能試験として認められており、どちらかに合格すればよい。

Table 1には費用（試験体材料費含む）や国内の試験装置台数の比較も併せて示す。発熱性試験は試験体が小さく、短時間で複数回実施できる利点がある。また、室内に装置を設置でき、専有面積も小さいことから第三者評価機関だけでなく、大林組のように自社保有する企業も少なくない。模型箱試験は縮小模型であるものの大きな排気フード等が必要となるため、認定試験を実施する第三者評価機関が保有している。また、試験体も大きくなり、試験後の試験体撤去や廃棄にも時間を要する。ルームコーナー試験は法定試験でないこともあり試験装置を保有する機関はごくわずかである。また、試験体も実大サイズであるから、試験体の設置から試験後の試験体撤去や廃棄にもさらに時間を要する。

次に、天井木ルーバーの燃焼を評価する場合を考える。Fig. 1に示すとおり、天井木ルーバーの特徴として①天井より下に設けられ、ふところがある点、②水平方向に一定の離隔距離（ピッチ）を設けて設置される点、③火源からの加熱に加えて隣接するルーバーが燃焼した場合はそちらからの加熱も考えられ、複数面から同時加熱される点が挙げられる。そのため、これらの特徴を踏まえて燃焼性状を評価することが望ましい。

発熱性試験では100mm角の試験体という寸法制限がある点や水平設置時の上方からの一面加熱である点から天井木ルーバーの特徴を再現できない。模型箱試験では、天井木ルーバーの特徴を再現した実験は実質的に可能と考えられるものの、法定の試験方法では試験体を壁および天井に隙間なく敷き詰める必要があるため、天井木ルーバーの特徴を再現できない。ルームコーナー試験は実大で天井木ルーバーの特徴を再現した燃焼実験が可能

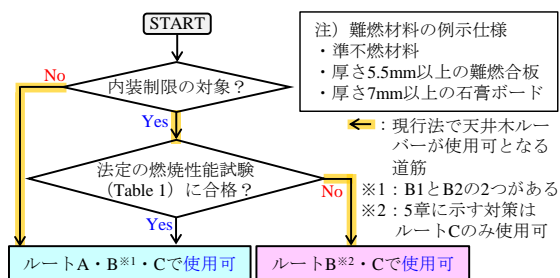
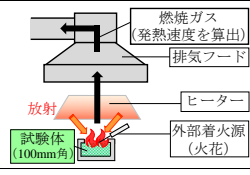
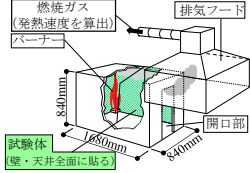
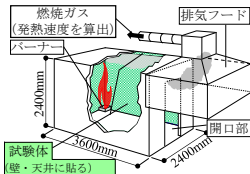


Fig. 2 内装制限の評価フロー
Evaluation Flow of Interior Restrictions

Table 1 内装材の燃焼評価に係る試験方法

Test Methods for Combustion Evaluation of Interior Materials

試験名	法定	試験方法	概要	費用	装置数	天井木ルーバーの再現	その他備考
発熱性試験	○ (※1)	水平に設置した試験体に放射熱を当てた状態で外部着火源により着火燃焼させ、発熱速度（燃焼時に発生するエネルギー）、総発熱量（発熱速度の積分値）および亀裂の有無を確認する。ISO5660-1に準拠。		◎ (安い)	◎ (多数)	×	<ul style="list-style-type: none"> 試験体面積あたりの火源量は大きい。 水平設置時の一面加熱であり、複数面の同時加熱は評価できない。 小口や目地部の再現には適さない。
模型箱試験	○ (※1)	室を模擬した約1/3スケールの模型空間内の側面および天井面全体にわたって隙間なく試験体を設置し、内部でバーナーを燃やした際の発熱速度、総発熱速度および亀裂の有無を確認する。ISO TS17431に準拠。		○	○	○(※2)	<ul style="list-style-type: none"> 壁/天井に設置できるため、建築空間の実態に合わせた評価が可能。 火災初期からフラッシュオーバーだけでなく、フラッシュオーバー以降も火災性状を確認できる。
ルームコーナー試験	×	室を模擬した実大空間内の側面および天井面全体に試験体を設置し、内部でバーナーを燃やした際の発熱速度、総発熱速度および亀裂の有無を確認する。ISO9705-1に規定。		△ (高い)	△ (数台)	◎	<ul style="list-style-type: none"> 壁/天井に設置できるため、建築空間の実態に合わせた評価が可能。 火災初期からフラッシュオーバーまでが対象。なお、フラッシュオーバーの発生の有無は模型箱試験と良好な相関性を確認済

※1：別途燃焼ガスの有害性を評価するガス有害性試験（詳細は省略）が必要となる。

※2：法定の試験方法では、天井面全体に「隙間なく」試験体を設置しなければならないためルーバーの特徴を再現できない。

だが、法定試験には該当しない。

以上を踏まえると、現時点では天井木ルーバーの特徴を再現しつつ燃焼性状を評価する統一的な手法がない。そのため、本論文ではTable 1に示した既往の実験装置を用いるものの、独自の方法でその燃焼性状を評価する。

2.3 ルーバーの形状や寸法による影響

天井木ルーバーの特徴はFig. 1に示すルーバーの幅Bと厚さt、ルーバー間のピッチP、天井のふところ寸法hの4つの変数に大別できる。これらの変数は、建築計画により様々であり、燃焼性状に及ぼす影響は明らかではない。そのため、これらの変数と燃焼性状（燃焼の激しさ）の関係が把握できれば、避難安全計画を策定するうえで有用である。そこで、本論文では上記4つの変数が燃焼性状に与える影響を把握することとした。

3. 天井木ルーバーの燃焼メカニズム

Fig. 3は、実験による観察結果をもとに天井木ルーバーの燃焼フェーズを整理したものである。天井木ルーバーは、出火直後から火源より発生した熱気流に曝される（フェーズ1）。当該熱気流はルーバー間の開口を介して天井下に煙層を形成する。煙層は時間経過とともに厚さを増すとともに温度が上昇し、煙層に曝されたルーバーから可燃性ガスが発生し始める。さらに、火源の火炎が成長しルーバーに火炎が接し始めると、可燃性ガスに引火し、火源直上のルーバーの下面や側面が燃焼する（フェーズ2）。なお、当該ルーバーで生じた火炎は上昇気流を形成するため、ルーバーの上面へと燃焼拡大する。次に、燃焼したルーバー近傍のルーバーも煙層に曝されて可燃性ガスを発生させており、燃焼中のルーバーまた

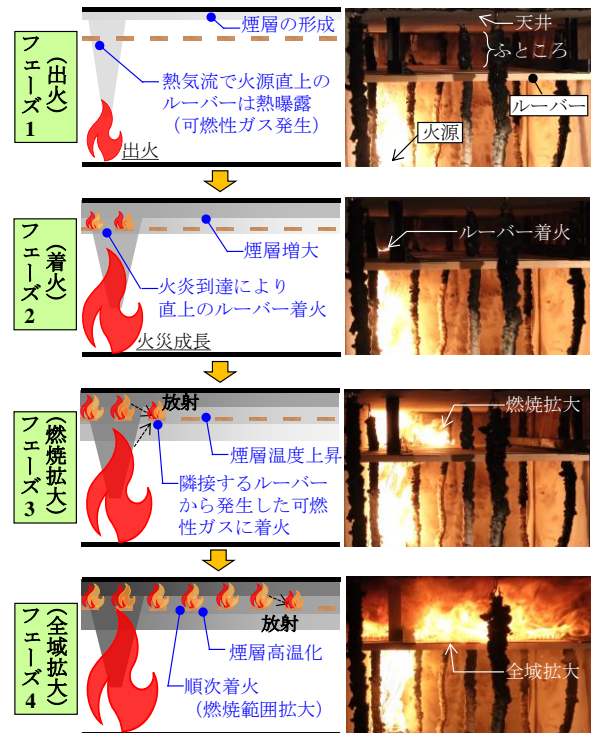


Fig. 3 天井木ルーバーの燃焼メカニズム
Combustion Mechanism of Wooden Louvers

は出火源からの火炎の到達により燃焼する（フェーズ3）。この繰り返しにより、火源近傍から水平方向に向かって連鎖的に燃焼拡大し、最終的には全てのルーバーが燃焼する（フェーズ4）。なお、火源から離れた領域では、燃焼中のルーバーの火炎からの熱的影響が支配的となるため、ルーバー下面よりルーバー上面が激しく燃焼する。また、時間の経過とともに燃焼範囲は急速に広がる。これは、時間の経過とともに天井下に蓄積する煙層の温度

が上昇し、ルーバーから放出される可燃性ガスが増加するためと考えられる。

4. 設計変数が燃焼性状に与える影響の把握

4.1 小規模実験（模型箱試験）

ルーバーの幅Bと厚さt、ルーバー間のピッチPを変数として、「防耐火性能試験・評価業務方法書^{例えぼ4)}」に準拠した模型箱試験装置による燃焼実験を実施した。なお、ふところ寸法hについては4.2節にて検討する。

4.1.1 実験模型 Fig. 4に(a)平面図、(b)断面図を示す。試験体を内寸で幅840mm、奥行き1680mm（床面積1.41m²）、高さ840mmの空間に設置した。当該空間は厚さ20mmの珪酸カルシウム板で構成し、幅300mm、高さ670mmの開口を設けた。火源は矩形（170mm×170mm）で高さ145mmのガスバーナーとし、開口がある壁面と正対する壁の隅に火源側面の2辺が接するように設置した。なお、模型の上部には5m×5mの集煙フードがあり、排煙ダクトを介して排煙ファンに接続した。

4.1.2 測定項目 下記の項目を測定した。

- (1) 火源発熱速度 Q_f マスフローコントローラにてガス流量を測定した。本実験では都市ガスを使用した。
- (2) 総発熱速度 Q_{all} 火源の発熱速度 Q_f と内装材燃焼時の発熱速度の合算である総発熱速度は、酸素消費法により測定した。
- (3) 燃焼状況 外部からビデオにて撮影した。

4.1.3 実験条件 Table 2に実験条件を示す。Table 2には、ルーバーの隙間面積を床面積で除した開口率 ϕ と(1)式で定義する可燃表面積比 ξ も示す。

$$\xi = A_c / A_{room} \quad (1)$$

A_c : 可燃表面積（詳細はFig. 4(b)参照）[m²]

A_{room} : 床面積(=0.84×1.68) [m²]

No. 1とNo. 2はヨコ使いとし、ピッチを変数とした。また、No. 3およびNo. 4はタテ使いとし、ピッチは各々で固定条件とした。なお、No. 4の可燃表面積比は、ヨコ使いと等しい条件とした。またNo. 1～No. 4共通で、ルーバーの樹種はスギとし、長さは一律800mmとして、短辺が火源側の壁に接するように設置した。

なお、比較として、難燃材料に準ずる仕上げ（国交省告示第707号）である、壁3面（開口がある壁以外）をスギ合板（厚さ12mm）かつ天井を準不燃材料とした条件（No.5）も実施した。

4.1.4 実験方法 試験体を設置後、火源に点火し燃焼性状を確認した。実験時間は600秒とした。なお、火源発熱速度 Q_f は、法定の模型箱試験^{例えぼ4)}では開始直後から40kW一律で加熱されるが、ルーバーが徐々に燃焼する過程を捉えるため、Fig. 5に示すとおりステップ火源とした。

4.1.5 実験結果 Fig. 6に全条件の代表時刻における燃焼状況を示す。Fig. 6より、火源の点火後160秒前後で火源直上のルーバーに着火した。これは全条件とも同様であった。160秒以降は時間の経過とともに徐々に隣接す

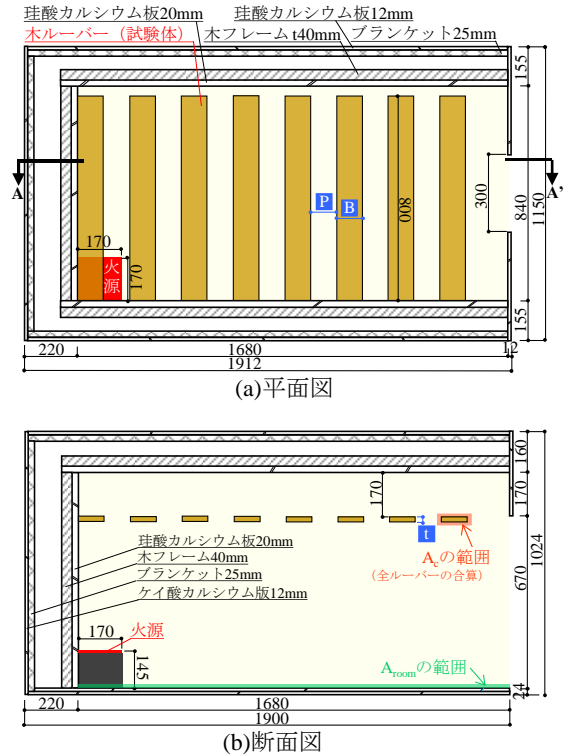


Fig. 4 模型箱試験装置の概要
Overview of Model Box Test Equipment

Table 2 実験条件（模型箱試験）
Experimental Conditions (Model Box Test)

No.	幅 B [mm]	厚さ t [mm]	ピッチ P [mm]	ふところ 寸法 h [mm]	開口率 ϕ [%]	可燃表面 積比 ξ [%]
1	100	20	100	170	47	108
2	100	20	30~40		25	149
3	20	100	110~120		84	176
4	50	100	150		74	149
5	壁3面のみ合板12mm				-	-

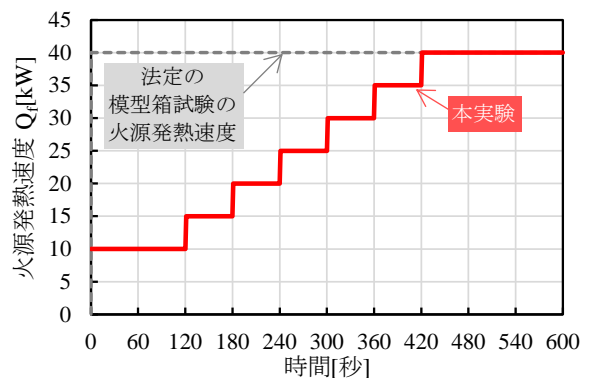


Fig. 5 火源発熱速度 Q_f
Heat Release Rate from Fire Source Q_f

るルーバーへ延焼した。燃焼拡大の速度は各条件によって異なり、No. 2が最も早く、300秒経過時点で11本中の7本と半数以上が燃焼し、540秒経過時点では開口から炎が噴出した。なお、難燃相当（No. 5）は約330秒で開口から

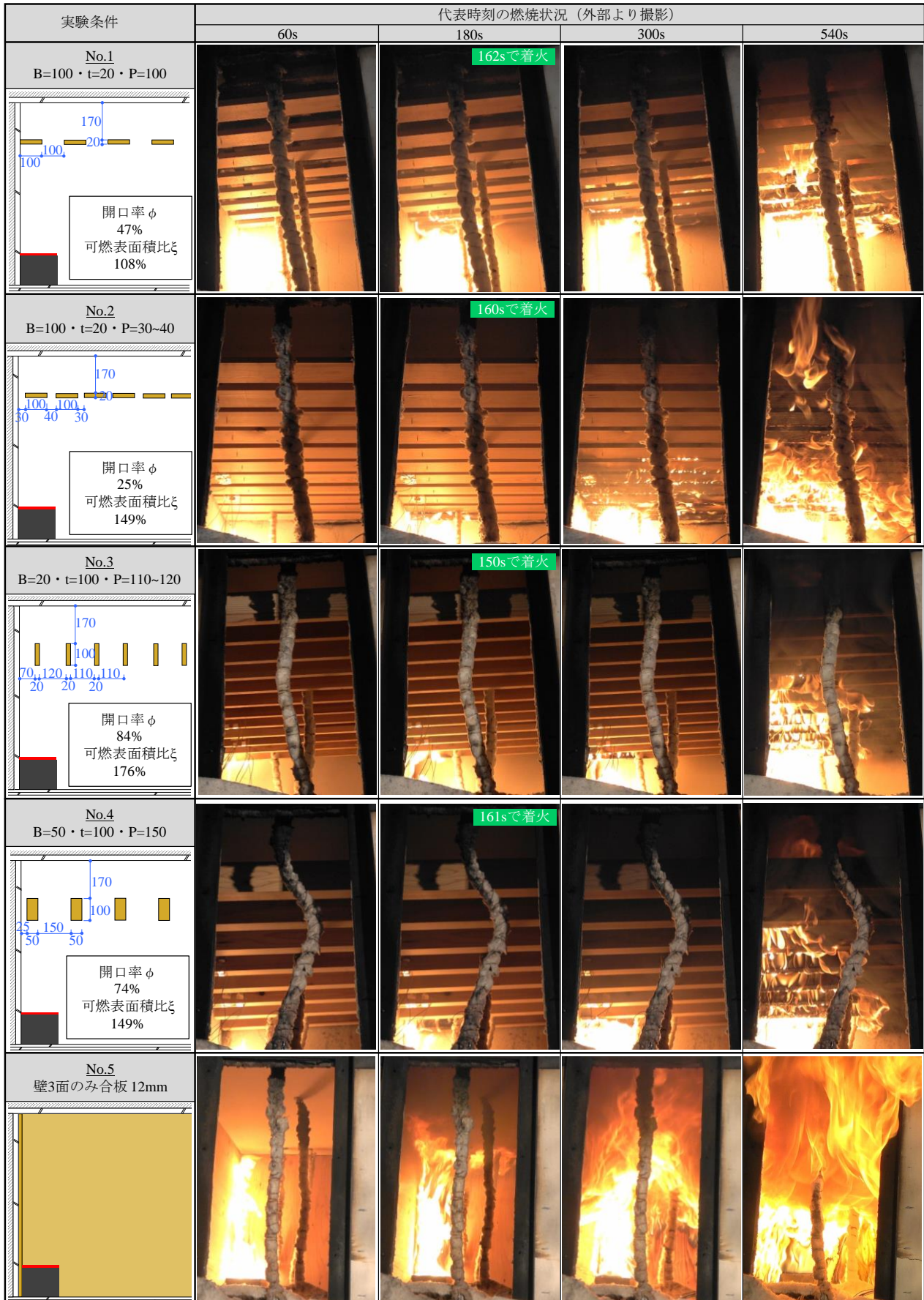


Fig. 6 代表時刻の燃焼状況 (模型箱試験)
Combustion Conditions at Representative Time (Model Box Test)

炎が噴出した。

Fig. 7に、全条件の総発熱速度 Q_{all} およびNo. 1の火源発熱速度 Q_f を示す。なお、 Q_{all} は計測の特性上、若干振動するため、60sの移動平均とした。なお、火源発熱速度 Q_f はどれも同一であったため、同一時刻での Q_{all} が大きい条件は天井木ルーバーの燃焼が激しいことを意味する。Fig. 7より、No. 1からNo. 4はいずれも160秒頃まではほぼ同じ値を示している。なお、映像で着火を確認できた160秒時点の Q_{all} は約20kWであり、当該時刻の Q_f とおおむね同一である。これは、天井ルーバーがまだ燃焼していないことを意味し、前述の映像による観察結果と一致する。160秒以降は、天井木ルーバーの燃焼に伴い、 Q_{all} と Q_f の差が大きくなる。なお、以降では難燃材料の性能要求時間である300秒までの結果を主に考察する。

まず、開口率 ϕ について考察する。開口率が47%以上の条件 (No. 1, No. 3, No. 4) は燃焼性状にあまり大きな差は見られなかった。一方で、開口率が小さいNo. 2は天井木ルーバーの着火以降、 Q_{all} が急激に増加する。開口率が小さいことはピッチが狭いことを意味し、ピッチが狭いと着火したルーバーから隣接ルーバーへの放射強度が高くなるため、燃焼が拡大しやすいと考えられる。次に、ヨコ使いとタテ使いを比較する。ピッチがほぼ同程度であるNo. 1とNo. 3を比べると、若干ではあるがタテ使い (No. 3) の方が、燃焼性状が緩慢である。これは、燃焼しやすいルーバー上面の面積がタテ使いの方が小さいためと考えられる。なお、360秒を超えるとヨコ使い (No. 1) と概ね同等の燃焼性状となる。

最後に、可燃表面積比 ξ について考察する。No. 2とNo. 4の可燃表面積比は同一だが、燃焼性状は大きく異なる。また、本実験内での可燃表面積比 ξ が最大であるNo. 3は、他条件より激しく燃焼するわけではない。

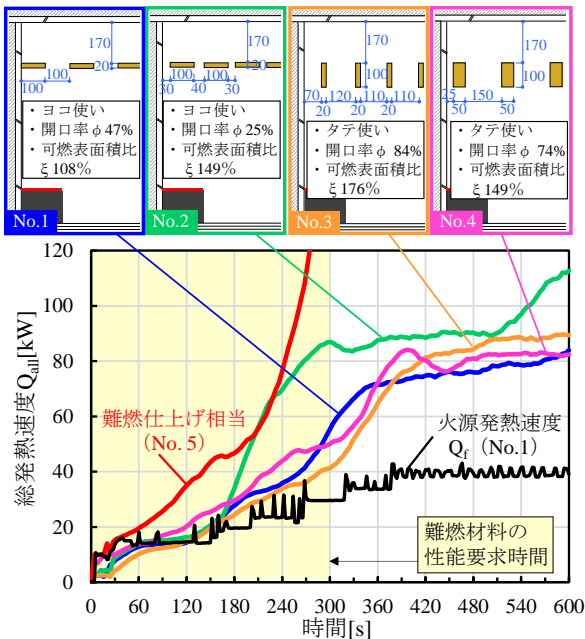


Fig. 7 測定結果 (総発熱速度 Q_{all})
Measurement Results (Total Heat Release Rate Q_{all})

以上のことより、天井木ルーバーの燃焼性状は、開口率 (ピッチ) が支配的な影響因子であり、開口率が小さいと燃焼が激しくなる。また、タテ使いよりヨコ使いの方が激しく燃焼する。一方、可燃表面積比 ξ はあまり影響しなかった。なお、本実験条件のいずれも難燃材料に準ずる仕上げ相当 (No.5) を下回った。

4.2 実大実験 (ルームコーナー試験)

ふところ寸法 h を変数としてルームコーナー試験装置による実大燃焼実験を実施した。

4.2.1 実験模型 Fig. 8に(a)平面図, (b)断面図を示す。空間は、内寸で幅2400mm, 奥行き3600mm, 高さ2400mmであり、幅800mm, 高さ2000mmの開口を設けた。火源は矩形 (300mm×300mm) のガスバーナーとし、隅角に火源側面の2辺が接するよう設置した。なお、実験模型の上部には5m×5mの集煙フードを設置した。

4.2.2 測定項目 下記の項目を測定した。

- (1) 火源発熱速度 Q_f マスフローコントローラでガス流量を測定した。燃料はプロパンガスを使用した。
- (2) 総発熱速度 Q_{all} 4.1.2節同様、酸素消費法により測定した。
- (3) 燃焼状況 内外部でビデオにて撮影した。なお、内部からの撮影はFig. 8(b)に示すとおりルーバーを見上げる形で床面にビデオカメラを設置した。

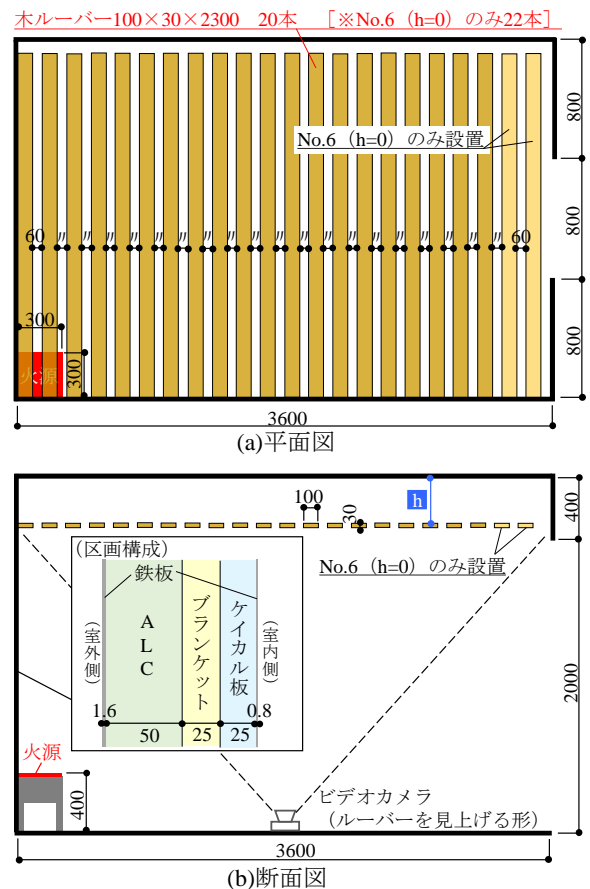


Fig. 8 ルームコーナー試験装置の概要
Overview of Room Corner Test Equipment

4.2.3 実験条件 4.1節の結果を踏まえて、Table 3に示すとおり燃焼が激しいヨコ使いを採用した。全条件とも幅100mm、厚さ30mm、長さ2300mmで一律とし、ふところ寸法を0mmから400mmまで設定した。ただし、施工の都合上、ふところがある条件は20本（ふところがないNo.6のみ22本）とした。ルーバーは短辺が火源側の壁に接するよう設置した。材質はスギである。比較として難燃材料に準ずる仕上げ（国交省告示第707号）である、壁3面（開口がある壁以外）をスギ合板（厚さ12mm）かつ天井は準不燃材料の条件も実施した。

4.2.4 実験方法 試験体を設置後、火源に点火し燃焼性状を確認した。実験時間は、難燃材料の性能要求時間である300秒とした。火源発熱速度 Q_f は、Fig. 9に示すとおり t^2 火源を模擬したステップ火源とした。ISO9705-1に定められたルームコーナー試験では開始直後から100kW一律だが、ルーバーが徐々に燃焼する過程を捉えることと、実際の火災を模擬することを意図して、避難安全検証法で用いる t^2 火源を採用した。ただし、火源からの火炎がルーバーに常に接した255kWで頭打ちとした。

4.2.5 実験結果 Fig. 10に全条件の総発熱速度 Q_{all} およびNo. 6の火源発熱速度 Q_f を、Fig. 11に全条件の代表時刻の燃焼状況を示す。なお、Fig. 10の Q_{all} には、3.1節同様に60秒の移動平均操作を施した。全条件とも90秒経過時から火源からの火炎がルーバーに達し始め、Fig. 11に示すとおり130秒から150秒の間でルーバーに着火した。

ふところがないNo. 6 ($h=0$)は、ルーバーへ着火して以降は火源直上を中心として四分円状に燃焼が拡大したが、300秒時点での燃焼範囲は後述するふところを設けた条件と比べると小さかった。

ふところを設けたNo. 7 ($h=200$)、No. 8 ($h=300$)、No. 9 ($h=400$)の条件では、ルーバーに達した火源からの火炎の一部はふところ内に入り込み、ルーバーの側面や上面を燃焼させるとともに、残りはルーバー下面に衝突したのち水平方向に向きを変えて拡がった。そのため、火源近傍のルーバーは上面、側面、下面と3面にわたって加熱を受けたと考えられる。ルーバー着火以降は火源直上を中心として燃焼が拡大した。300秒時点の燃焼範囲は、No. 7 ($h=200$)に比べてNo. 8 ($h=300$)、No. 9 ($h=400$)の条件が広いことを確認した。なお、No. 8 ($h=300$)とNo. 9 ($h=400$)の燃焼範囲には大きな差異がみられなかった。

Fig. 10より、約150秒以降で Q_{all} が Q_f を上回っており、前述のルーバー着火の目視状況とおおむね一致した。着火以降は、No. 6 ($h=0$)の燃焼性状がもっとも緩やかであり、No. 7 ($h=200$)、No. 8 ($h=300$)の順でふところ寸法が長くなるほど激しい燃焼性状を示した。しかし、No. 9 ($h=400$)は傾向が異なり、No. 8 ($h=300$)に比べて約210秒頃までは緩やかな燃焼を示したが、210秒を超えると急激に燃焼し始め、300秒時点ではさほど変わらない結果となった。

この原因としてふところ寸法が長くなると、火源との距離が短くなり火源近傍のルーバーは着火しやすくなる一方で、ルーバー上面が面する煙層温度は低くなるため

Table 3 実験条件（ルームコーナー試験）

Experimental conditions (Room Corner Test)

No.	幅 B [mm]	厚さ t [mm]	ピッチ P [mm]	ふところ 寸法 h [mm]	開口率 ϕ [%]	可燃表面 積比 ξ [%]
6	100	30	60	0	36	93
7				200		138
8				300		138
9				400		138
10	壁3面のみ合板12mm				-	-

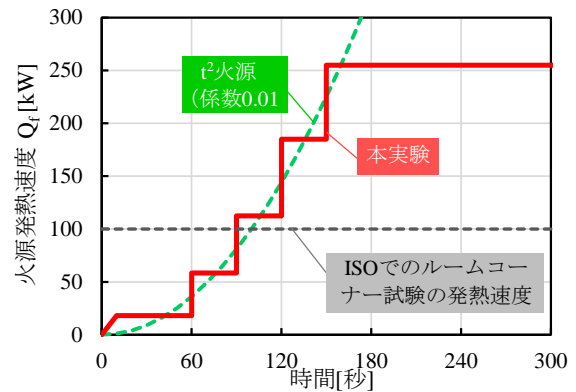


Fig. 9 火源発熱速度 Q_f

Heat Release Rate from Fire Source Q_f

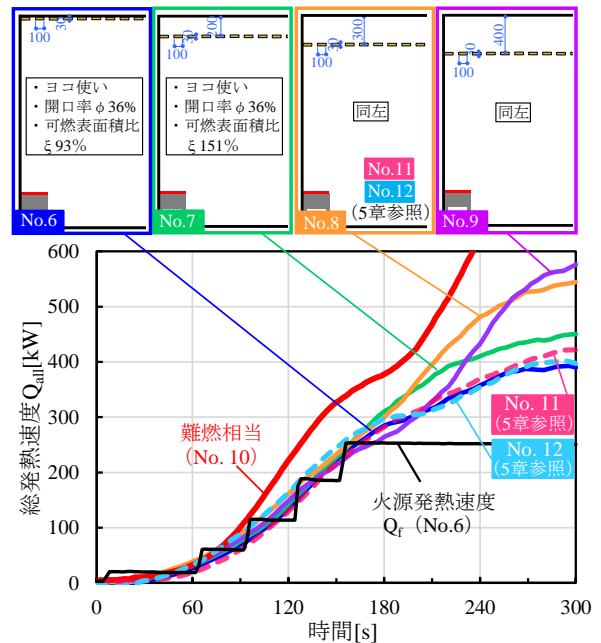


Fig. 10 測定結果（総発熱速度 Q_{all} ）

Measurement Results (Total Heat Release Rate Q_{all})

ルーバーが着火温度に至るまでに時間を要するという、相反する要素が作用した結果と考えられる。今後、さらなる検討が必要であるが、ふところ寸法が長いほどルーバー着火以降の緩やかな燃焼が長く続き、300秒時点の燃焼性状としては本条件より緩やかとなると考えられる。

なお、難燃材料に準ずる仕上げ相当（No. 10）と比べると、本条件の範囲内では全条件とも Q_{all} は小さい結果となった。

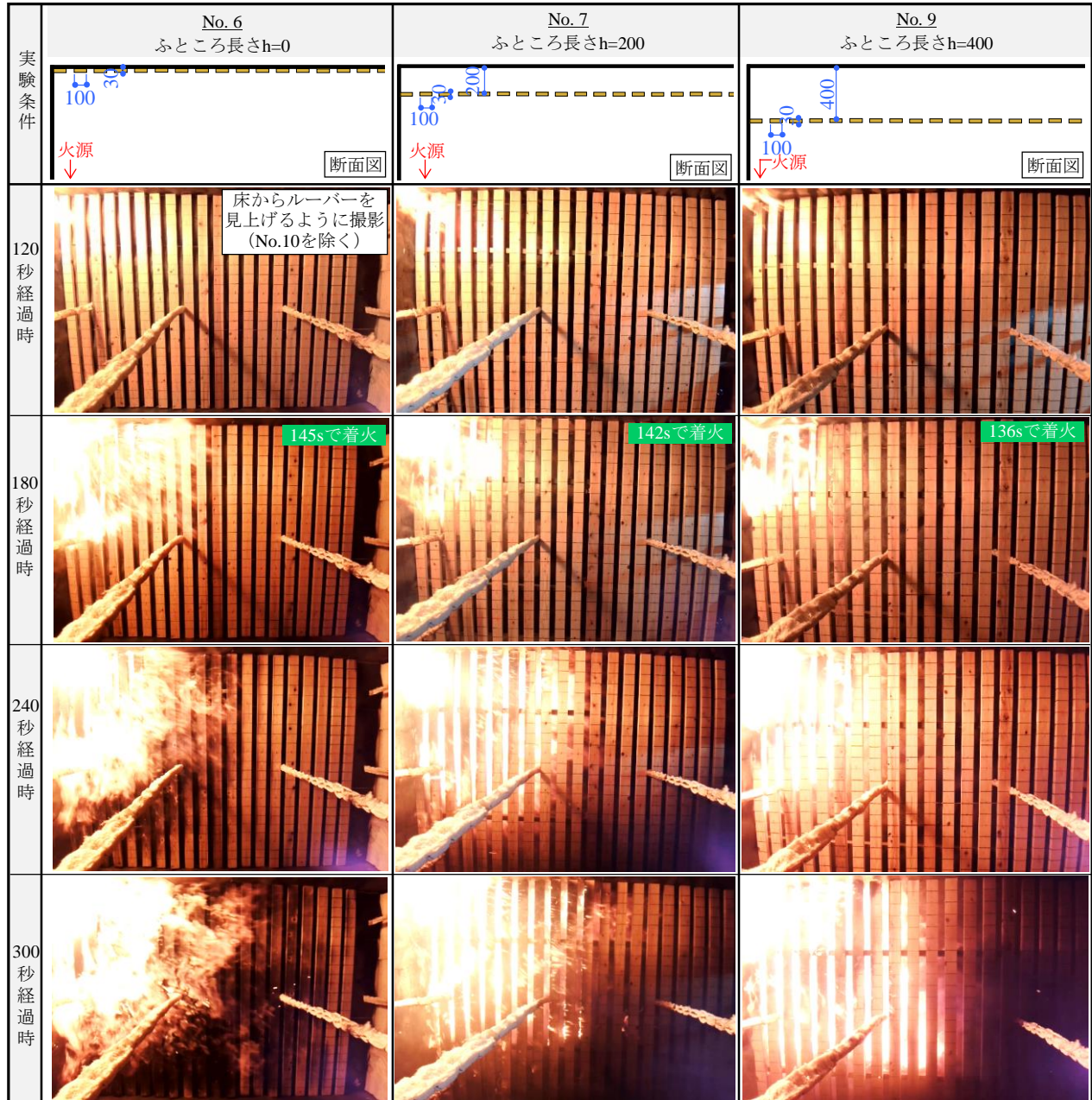


Fig. 11 代表時刻における燃焼状況 (ルームコーナー試験)
Combustion Conditions at Representative Time (Room Corner Test)

5. 燃焼抑制対策の開発

これまでの検討を踏まえると、開口率の小さいヨコ使いは火源直上のルーバーに着火して以降急速に燃焼が拡大する。在館者の避難安全を考えると、Fig. 12(a)に示すとおり頭上のルーバーが燃焼している中を避難する状況は好ましいとは言えず、Fig. 12(b)に示すように、燃焼範囲を極力限定化し、火源から遠ざかれば安全である状況となるよう計画に配慮することが望ましい。一方で、木質内装を採用する以上、木を視認できるように計画したいが過剰なコスト増を避けたいという要望もある。そこで、これらの条件を満足しつつ、かつ簡便な対策で水平方向

への燃焼拡大抑制を抑制できないか検討した。以下ではその実証実験について述べる。なお、用いた実験装置、実験方法等は4.2節と同一であるため、記載は省略する。

5.1 試験体の詳細

Fig. 13に試験体の概要を示す。検討対象は2仕様とし、いずれも4.2節で用いたルーバー (材種スギ、ふところ長さhは300) に対して、a)市販のアルミ箔テープを上面に貼付したもの (No. 11) とb)ガラスウール25mmを上面に貼付したもの (No. 12) である。

いずれもルーバー上面への伝熱抑制を期待したもので、No. 11はルーバー上面の放射を反射することを目的とし

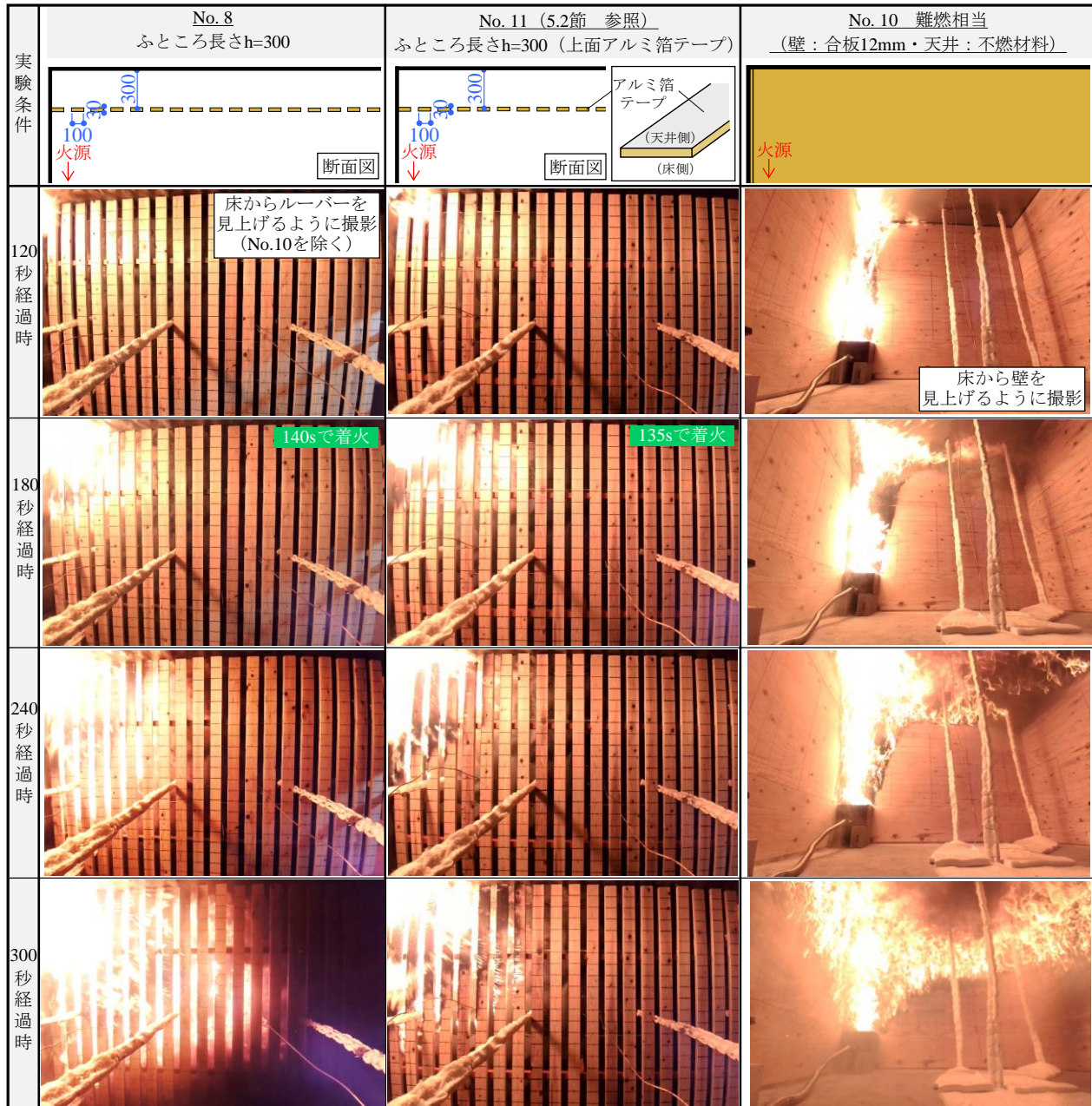


Fig. 11 代表時刻における燃焼状況 (ルームコーナー試験) [つづき]
Combustion Conditions at Representative Time (Room Corner Test)

た。なお、ルーバーの上面は在館者からは死角となり意匠性も低下しない。アルミ箔テープは厚さ0.07mmであり、角部に面を合わせるよう貼付した。No. 12は熱抵抗を大きくすることを目的とし、グラスウールは500mmピッチでタッカー固定し、角部に面が合うように貼付した。なお、No. 12は副次的に吸音効果も期待でき、別途実施した吸音実験によりその性能も把握した。

5.2 実験結果

前掲のFig. 10に、No.11およびNo.12の総発熱速度 Q_{all} を、Fig. 11にNo. 11の代表時刻の燃焼状況を、Photo 1に300秒経過時の燃焼状況の比較を示す。

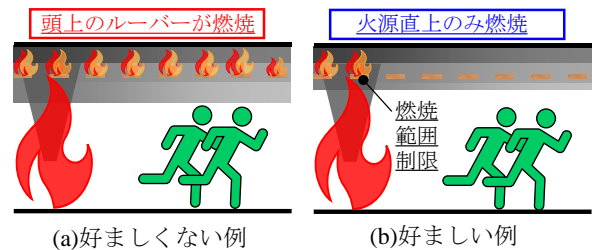


Fig. 12 天井木ルーバーの避難安全計画
Evacuation Safety Plan for Wooden Louvers

Fig. 10に示すとおり、 Q_{all} はNo. 11およびNo. 12とも対策なし(No.8)と180秒程まで同じであるが、180秒以降は

より緩やかな燃焼性状を示した。また、Fig. 11やPhoto1に示すとおり燃焼範囲を火源直上近傍に限定できることを確認した。

6. まとめ

天井付近に設置された不燃処理を施さない木製ルーバーの燃焼性状を評価すべく、燃焼実験を実施した。本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 出火後一定の時間を経た後、火炎がルーバー近傍に到達すると火源直上のルーバーが着火燃焼する。また、ルーバーに到達した火炎の一部はふところ内に入り込み、ルーバーの側面や上面を燃焼させるとともに、残りはルーバー下面に衝突し水平方向に向きを変えて広がった。そのため、ルーバーは上面、側面、下面と複数面が同時加熱される状況を確認した。
- 2) 火災初期の燃焼性状は、開口率（天井木ルーバーのピッチ）が大きな支配要因であり、開口率が小さくなるほど燃焼が激しくなった。また、タテ使いよりヨコ使いの方が、燃焼が激しくなった。一方、可燃表面積比は影響があまりなかった。
- 3) ふところを設けた条件は、ふところを設けない条件に比べて燃焼が激しくなる傾向を示した。
- 4) ふところ寸法が短いほど、ルーバー着火直後は激しく燃焼したが、時間が進むとふところ寸法が長い条件の方が激しく燃焼した。300秒時点の燃焼性状は、ふところ寸法が300mm以上の条件ではあまり差異がみられなかった。
- 5) 難燃材料に準ずる仕上げ相当（国交省告示第707号）との比較を行った結果、本実験の範囲内における天井木ルーバーは難燃材料よりも燃焼性状が緩やかであることを確認した。ただし、前述のとおり設計変数によって燃焼性状は異なる点には留意すべきである。
- 6) 燃焼性状が激しい条件、すなわち開口率が小さく、かつ、ルーバーをヨコ使いとした条件を主対象として燃焼抑制対策技術を開発した。当該技術を施したルーバーの実証実験を行い、300秒時点まで火源直上近傍のみに燃焼抑制できることを確認した。

なお、今後はさらなる実験データの拡充に努めるとともに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について検討する。

参考文献

- 1) 榎本, 他, “都市木造の実現に向けた構造技術の開発”, 大林組技術研究所報 No. 85 2021, 2021-12

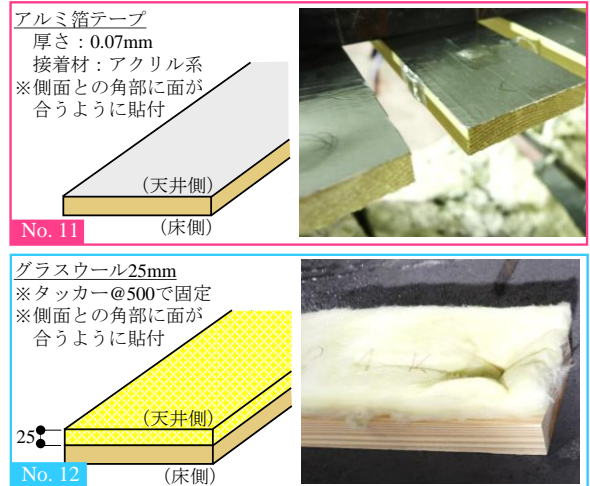


Fig. 13 燃焼抑制対策を施した試験体
Test Specimen with Measures to Control Combustion



Photo 1 300秒経過時の燃焼結果の比較
Comparison of Combustion Results after 300 Seconds

- 2) 岸上, 他, “高層木造建築物Port Plus®での避難安全設計”, 大林組技術研究所報 No. 86 2022, 2022-12
https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/085/2021_085_22.pdf, (参照 2023-07-10)
- 3) 高橋, 他, “金属箔による木材不燃化技術”, 大林組技術研究所報 No. 83 2019, 2019-12
https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/083/2019_083_37.pdf, (参照 2023-07-10)
- 4) 日本建築総合試験所, “耐火性能試験・評価業務方法書”, 一般財団法人日本建築総合試験所, 2023-04-01
<https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/8A-103-01.pdf>, (参照 2023-07-10)
- 5) 日本建築センター: 避難安全検証法 (時間判定法) の解説及び計算例とその解説, 一般財団法人日本建築センター, 357p., 2023-03-30