

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

■研究成果概要報告書

研 究 課 題		木質仕上げ材の自己展炎性制御に関する検討	実 施 年 度
			2018 年度
研究代表者	所属	森林総合研究所 任期付研究員 / 早稲田大学	
	氏名	高瀬 棕	
	問合せ先メールアドレス	ryotakase@ffpri.affrc.go.jp	
共同研究者	氏名・所属・職	上川大輔（森林総合研究所 チーム長・博士（工学））	
受入担当責任者	氏名	松山 賢	

1. 研究の背景および目的

アトリウムや外壁面など、人の往来に面した空間では意匠の自由度が求められる。同時に、このような空間においては、仕上げ材への全面的な加熱が生じにくいことから、壁装材における自己火炎伝播の制御が火災安全上の重要な課題であると考えられる。類似の例として、居室の壁面は天井を準不燃以上の仕上げとすること、木材に火炎伝播を助長するような溝を設けないことを条件として無処理木材の仕上げが許容されている。このような壁装材の燃焼実験の例としては菊地らの報告が参照でき、木材に溝を切ることで燃え止まり高さは上昇したものの、持続火炎伝播には至らなかったことが報告されている。鉛直ルーバーも広義に溝形と捉えることはできるが、単に木板に溝を切ったものと比べて、大型のルーバーでは溝内を通過する火炎の厚みが増すことで火炎の放射率が上昇することが予想されるため、持続火炎伝播の危険性などについては改めて検証する必要があると考えられる。これまでの建築物において、木質ルーバーは難燃処理を施すか、造作物として取り扱うことで実現されてきたことが多いため無処理木材で構成した壁面ルーバーの火災安全性は明らかでない。もちろん難燃処理を行って可燃性ガスの発生を抑制すれば、形状に関係なく火災安全性を確保できるものの、長期使用における耐候性や、その評価方法については未だ多くの課題が残されている。また価格も高価であることを鑑みると、無処理木材で展開できる壁装仕上げのバリエーションを検討する必要性が依然として高いと考えられる。そこで本研究は無処理木材によるルーバー、とりわけ危険側と想定される鉛直ルーバーを主な対象に据えて、持続火炎伝播の発生条件を把握するとともに、火災拡大抑制に効果的な手法の例を検証した。これらの検討から、燃え止まり高さの実測結果および、火炎伝播が生じるようなルーバーにおける、難燃処理以外の火災拡大防止策の見通しを得た。

2. 利用施設及び利用日

- ・ 5m 集煙フード・ガス分析装置 (2018 年 9 月 10 日 ～ 10 月 23 日 延べ 10 日間)

3. 実験方法・研究成果、および考察（申請時の計画に対する達成度合いも含む）

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

3. 1 実験計画

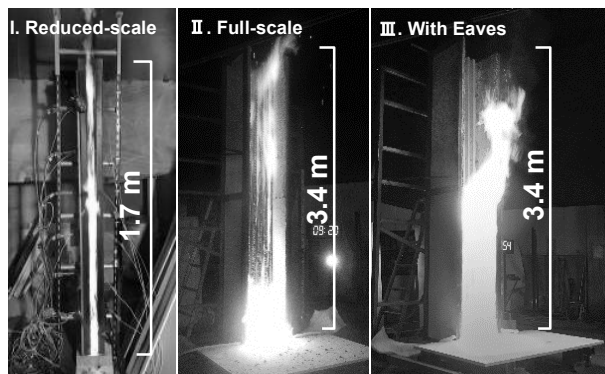


Fig.1 Flow of Experiments

実験は Fig.1 に示すように、I: ルーバー羽板の要素実験（森林総研にて実施）、II: 火源近傍を想定したフルスケール実験、III: 防火的措置の検証実験、の 3 段階に分けて行った。ルーバー羽板の要素実験は、羽板間の溝 1 スパン分を抜き出し、ごく小規模な火源からの燃え広がりを評価して燃え止まり高さの口火火炎高さに対する比を実測することを主な目的として行った。フルスケール実験は、家具の燃焼程度まで成長した火源からの燃え広がりを評価することを目的に実施した。前述 2 つの実験は基本的に、背面に不燃の壁面があるルーバーを想定して行った。さらに、防火的措置の実証実験は、不燃の壁面で裏打ちしないルーバーにも対象を広げ、その開口率の高さが利点となるような防火的措置（庇）の検証実験とした。

3. 2 ルーバー羽板の要素実験

(1) 供試体

板厚 18mm の MDF を向かい合わせて配置し、ルーバー溝内の空間を要素的に再現した。MDF にて燃焼性状が顕著に異なった仕様についてはスギでの検証も追加した。供試体高さは目地等を設けずに施工可能であることを要件として 1700mm とし、Fig.2 に示すように軽溝形鋼で裏打ちすることで、対向する 2 面に燃焼範囲を限定しつつ供試体の実験中の崩落を防いだ。供試体は 1 ヶ月間、23℃50%RH の恒温恒湿室内で養生して実験に供した。MDF は絶乾密度 601kg/m³、含水率 8.0%で、スギは絶乾密度 280～351kg/m³、含水率 9.6%であった。

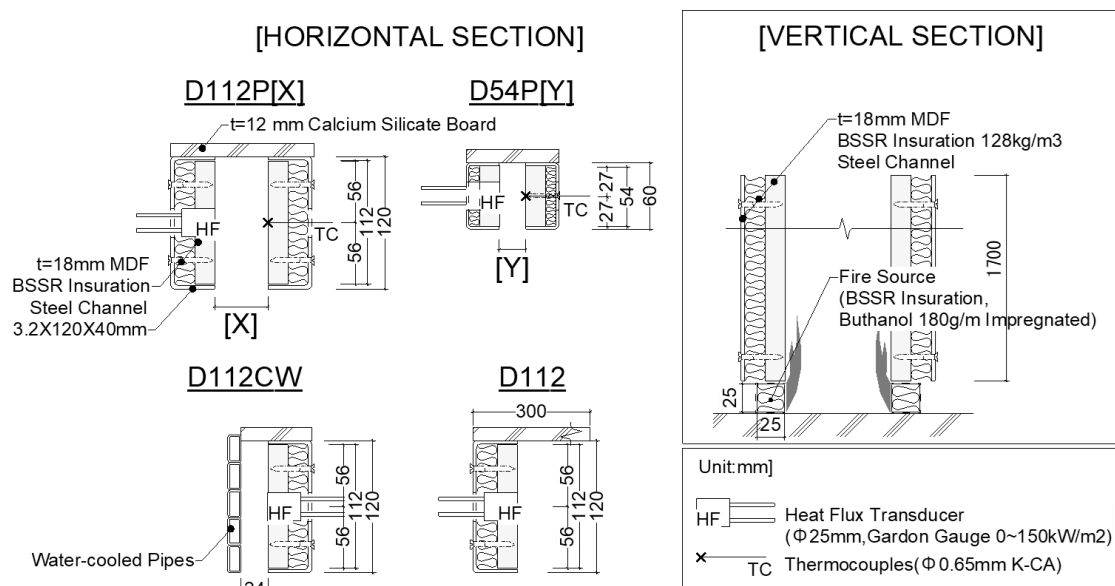


Fig.2 Specimens for Reduced-scale Tests

凹凸形状を持つ壁面において燃焼を促進する要因には燃焼面が向かい合うことによる熱損失の低減、空気の巻き込みが制限されることによる火炎の伸長などが想定される。このうち、前者の因子である放射の影響については、ルーバー形状が平面的に相似ならば羽板からみた対向面の形態係数は殆ど同一となることから、出寸法 112mm の系列で燃焼様態の境界となる平面形状を把握したのち、限界となった仕様を平面的に縮小して絶対寸法の影響を検証した。試験体名は Depth, Pitch の順で D112P48 のように表記する。また、火炎伝播の生じた仕様について、対向面との熱伝達を排して空間的に半割にした仕様が D112CW（ピッチ 24mm）である。

(2) 火源

本検討にて対象とした立体物の場合、試験体間で羽板の幅や溝内の容積が異なるが、ここでは羽板の単位幅あたりの火源発熱速度を揃えることとして、火源には各羽板の出寸法と同一の長さに切り出した 25mm 角のセラミックファイバーウールにブタノールを 180g/m 含浸させ、噴出面以外を金属箔により被覆したものを使用した (Fig.2 立断面)。事前に火源単体の発熱を、コーンカロリメーターの放射加熱を切った状態で計測した結果、点火後およそ 6 分間、10~15kW/m (平均 12.8kW/m) の発熱速度で推移した。

(3) 計測項目

試験体表面の温度分布を羽板中央軸上、高さ方向に 250mm 間隔で計測し、入射熱流束を対向面の同位置で計測した。D112CW および D112 においては熱流の計測位置を他仕様と揃え、熱電対を熱流束計の縁端から 15mm 下方に設置した。温度計測には素線径 0.65mm の K-CA 熱電対を、入射熱の計測には φ 25mm Gardon 型熱流束計 (測定レンジ 0~150kW/m²) を用いた。また、火炎高さは、60fps のビデオカメラで記録した映像から 5 秒

ごとに伸縮の 1 周期分の画像を等間隔に 5 フレーム書き出し、画像解析ソフト上で火炎先端の座標を拾い出した。解析ソフトは NIH(アメリカ国立衛生研究所)で開発されたオープンソースの画像処理ソフトである ImageJ を用いた。こうして得られた火炎の伸縮 1 周期の中の最大、最小、平均をそれぞれ上限、下限、平均火炎高さとして定義して表記する。この平均火炎高さは、通例用いられる L_f (火炎存在率 50%の高さ) の定義に従って計測した場合よりも +8%程度高く評価する傾向であった。

(4) 実験結果

Table 1 に全結果の概要を示す。MDF とスギの間で、装置内で評価可能な燃え止まり高さを超えるときの平面形状は概ね同様であったが、燃え止まり高さはスギの方が低い傾向であった。

Fig.3 に主な仕様の炭化状況、Fig.4 に火炎高さ、入射熱流束の推移を示す。D54P24、D54P48、D112P96 は時間とともに燃焼範囲が増加したが、それぞれ 5.2 分、3.2 分、6.5 分で燃え止まった。D112P48、D112P72 はいずれも試験体上端まで火炎伝播し、口火近傍が消炎したのちも上方で燃焼を継続した。また、D112CW、D112P48、D112 を比較すると、空気の巻き込みが抑制されることで、ルーバーのような凹凸形状では燃え止まり高さが増加するものの、それ自体は持続火炎伝播の直接的な原因でないことが分かる。さらに、D112P180 と D112 の燃え止まり高さはほぼ同等となった。

以上を溝深さと幅のアスペクト D/P で表現すると Fig.5 のようになる。 $D/P \leq 0.65$ では燃え止まり高さは平板と同程度となり、 $0.65 \leq D/P \leq 1.2$ にかけて大きく燃え止まり高さが増加する。 $1.5 \leq D/P$ で燃焼が指数関数的に増大する場合があった。

なお D54P48 については、次節において述べる実大実験と傾向が異なって平板と同程度の高さで燃え止まったことから、火源発熱速度を 2 倍とした実験(D54P48-2)も実施した。この結果、両試験体とも燃え止まったものの、燃え止まり高さは口火火炎高さとの比で 4.0 程度異なった。反対に、D112P48 が、より小規模な火源によって火炎伝播に至るかについても検証を行った (D112P48-2)。上端に到達する時間は遅延したものの、装置内で評価可能な燃え止まり高さを上回った。

以上の理由を考えると、燃焼が指数関数的に増大するような構法においては、可燃物自体の燃焼が時間とともに火源の燃焼を卓越するから、火炎伝播の有無に対する口火火炎高さの影響が小さかったと推測される。一方で、燃焼が収束する構法では、火源発熱速度が小さいと、それぞれの羽板が単独で燃焼する状態に近づくために燃え止まり高さが平板と同程度になったと考えられる。燃え止まり高さの絶対評価を小型試験で行うための火源条件は、口火近傍において着火限界の熱流束を確保するのみでは不十分で、空気の巻き込み性状を実態と揃えた条件のもとで評価する必要があると言える。

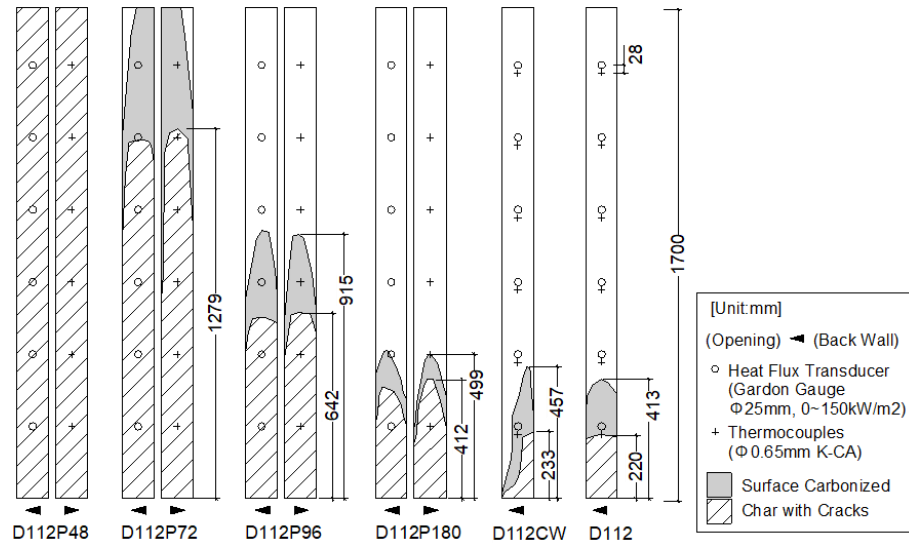


Fig.3 Patterns of Burnt Specimens

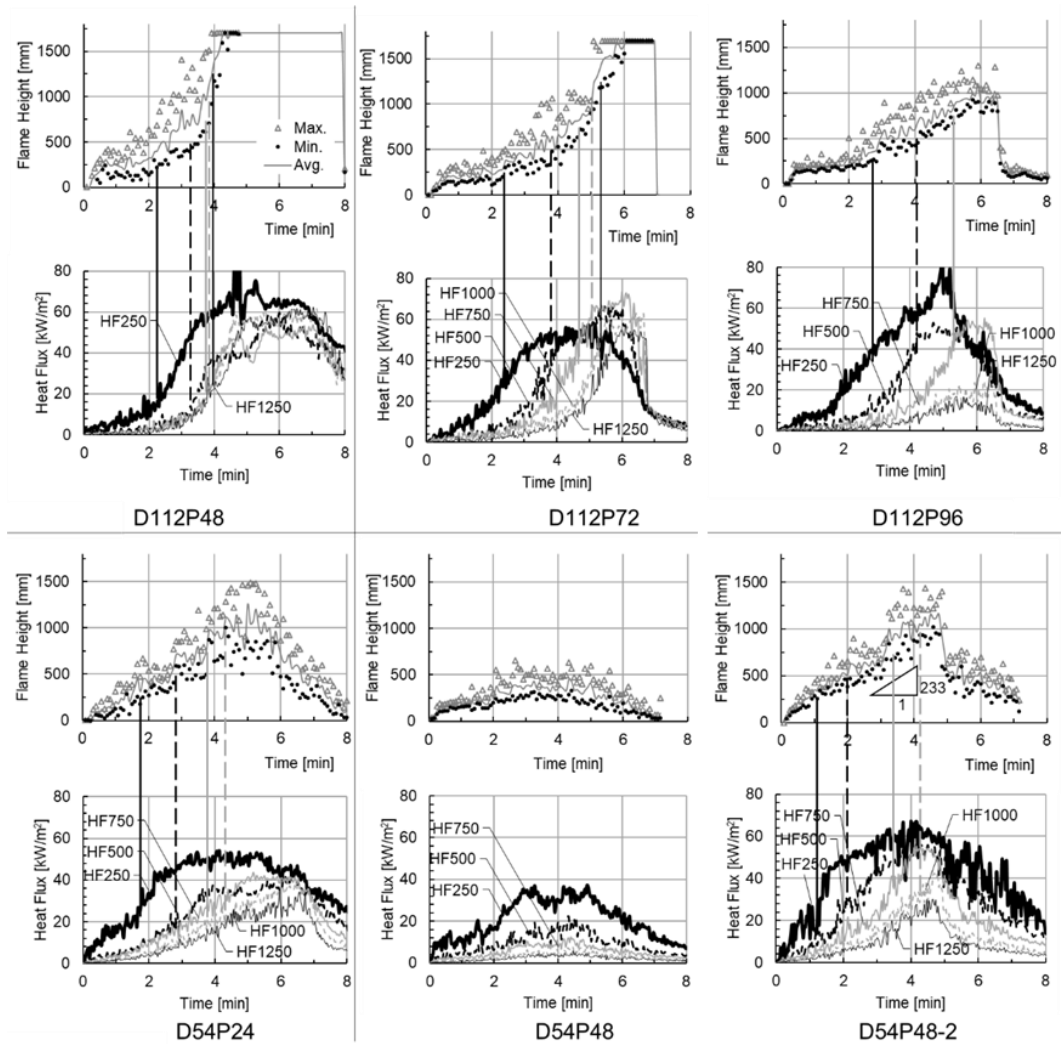


Fig. 4 Flame Height and Heat Flux in Reduced-scale Tests

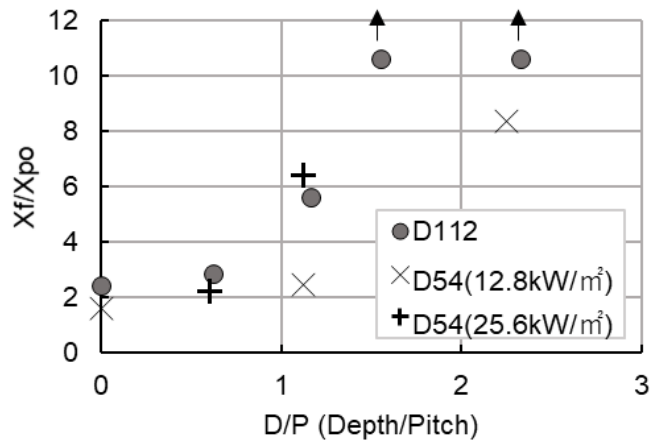


Fig.5 Louver Aspect and X_f/X_{po}

Table 1 Summary of Reduced-scale Tests

Specimen No.	Source Heat Release Rate [kW/m]*	X_f / X_{po}^{*2} [-]	Peak Height of Solid Flame [mm]	Duration until Peak [sec]
D112	12.8	2.4	385	230
D112CW		2.2	356	215
D112P180		2.8	452	305
D112P96		5.6	899	350
D112P72		>10.6	>1700	365
D112P48	12.8	>10.6	>1700	260
D54		1.6	194	200
D54P48		2.4	293	205
D54P24		8.4	1003	260
D112P48-2	6.4	>14.2	>1700	297
D54P90	25.6	2.2	345	195
D54P48-2		6.4	1024	275
Japanese Cedar	12.8	1.7	270	159
		1.7	270	204
		>10.6	>1700	162
		2.1	250	168

* Average from 60 to 360 sec

*2 Ratio of Solid Flame Height [Peak/Source Flame]

(5) 考察

Fig.4 中に各測定点に下限火炎が到達した時点での入射熱流束を示す線を書き入れてある。D112P96 では $36\sim 40\text{kW/m}^2$ であったが、D112P72 では、 $26\sim 42\text{kW/m}^2$ 、D112P48 では $20\sim 25\text{kW/m}^2$ 程度と、ピッチが狭まるほど下限火炎が到達した時の入射熱流束は低い傾向が認められた。木材の発熱性試験においては外部放射 20kW/m^2 程度で表面フラッシュが発生することが報告されており、また、鉛直方向での着火限界熱流束が水平方向の 1.15 倍程度と報告されていることを考慮すると、D112P48 において計測された入射熱流束はこれと同等であった。この程度の入射熱でも持続的に発炎がみられたのは、下方で発生した可燃性ガスの寄与によるものと考えられる。一方、これと相似な D54P24 については装置内で燃え止まっており、溝内の空間の相似性では燃え止まり高さが代表できない結果となった。入射熱流束が上方に向かって減衰していることから、とくに熱分解領域先端付近の燃焼が、火炎の薄さに起因して D112P48 ほど促進されなかったと推測される。また、Tsai らは幅の広い燃焼面においては火炎が中央に寄ること、火炎伝播速度が増加することを報告しており、これも大型のルーバーが危険側となった一因と考えられる。

D54P24 および D112P96 の 2 仕様におけるピーク時の下限火炎高さが $H=1,000\text{mm}$ 程度であったことから、この高さにおける羽板中央部への入射熱流束に関して考察する。実測した温度分布に基づいて対向面からの入射熱を算出し、仕様間の比較を行った。火炎からの伝熱は考慮せず、また放射源、受熱面とも放射率を 1 と仮定している。受熱面は熱流束計の水冷部を仮定して 60°C 、対向面のルーバーは高さ方向 250mm ごとに区切り、メッシュ毎に実測した温度を適用した。なお、 $H=1,000\text{mm}$ 以外の計測点を含めて、下限火炎が到達した時点の温度分布は Fig.6 の通りとなっている。特に羽板下方の温度分布にばらつきがあるものの、Fig.7 右に示す通り、実際に入射熱を支配するのは同一高さ付近の対向面であり、この位置の温度は比較的安定して 400°C 程度であることから、火炎伝播が生じた場合の一般的な傾向は示されていると考えてよい。

Fig.7 に計算結果を示す。下限火炎の到達時に、対向面からの放射による入射熱流束は D112P48 で 5.1kW/m^2 、D112P72 では 7.0kW/m^2 、D54P24 のピーク時に 6.2kW/m^2 (6.9 分)、D112P96 のピーク時に 1.9kW/m^2 (6.4 分) と算出された。また、上限火炎が到達した時点の入射熱については 1kW/m^2 未満であることも読み取れる。

これらの値について既往の知見と比較すると、Brehob らは、ポプラおよび OSB では 2.2kW/m^2 、合板では 7.6kW/m^2 の外部放射を点火と同時に与えたときに持続火炎伝播が生じたと報告している。本実験でも同程度の外部放射があることが確認されたと言えるが、これは未燃部を予熱する要因ではなく、熱分解領域先端付近の燃焼を促進する要因として捉えた方が、一連の実験結果をよりよく説明する。

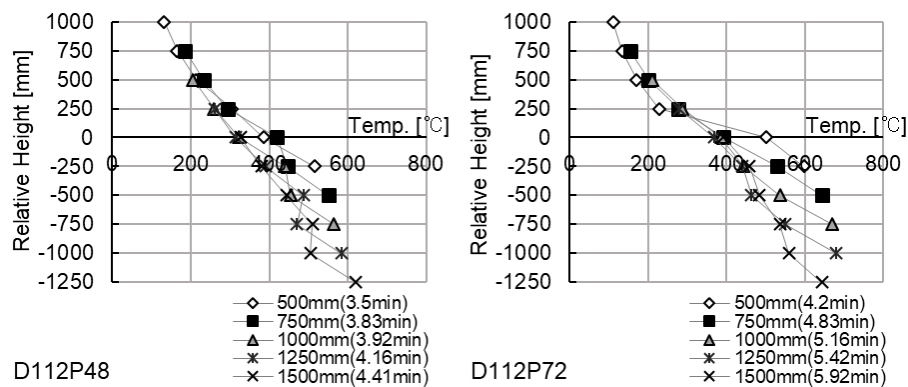


Fig.6 Temperature Distribution of the Facing Louver
viewed from the Tip of Solid Flame

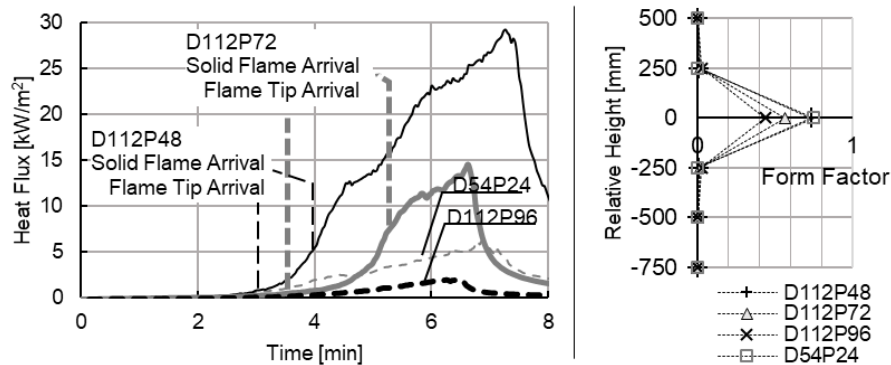


Fig.7 Estimated Heat Flux from the Facing Louver at HF-1000

3. 3 フルスケールの燃焼性把握および防火的措置の検証

前節の結果、ルーバーの平面形状ごとに、火炎高さが時間とともに指数的な傾向で増加するもの、ほぼ一定速度で燃焼したのち燃え止まるものに分かれた。これを踏まえて、本章では燃え止まり高さが顕著に増加した D54P48 を最も密な仕様として、椅子程度の火源からの燃え広がりを実測するとともに、この段階において有効な防火的措置の検証を行った。

(1) 実験方法

鉛直方向の上方火炎伝播をフルスケール、かつ多仕様について把握するために、Fig.8 に示す装置を製作して用いた。実験装置は自立する鋼製架台から試験体ユニットを吊り下げる収まりとした。また、幅広の燃焼面を1次元的に抜き出した状況を想定して、試験体両側面に側壁を設けた。火源は 500mm 角で、側壁の出寸法は、予備実験により面内に概ね均一に火炎が噴出するような条件を検討して火源の奥行きの 3/4(375mm)とした。実験は東京理科大学火災科学研究センター 火災実験棟の 5m フード下で実施した。火源は椅子程度の家具の燃焼を想定して、幅 500mm の実験装置に対して 200kW(メタン、流量 260L/min)と設定し、20 分の加熱を行った。

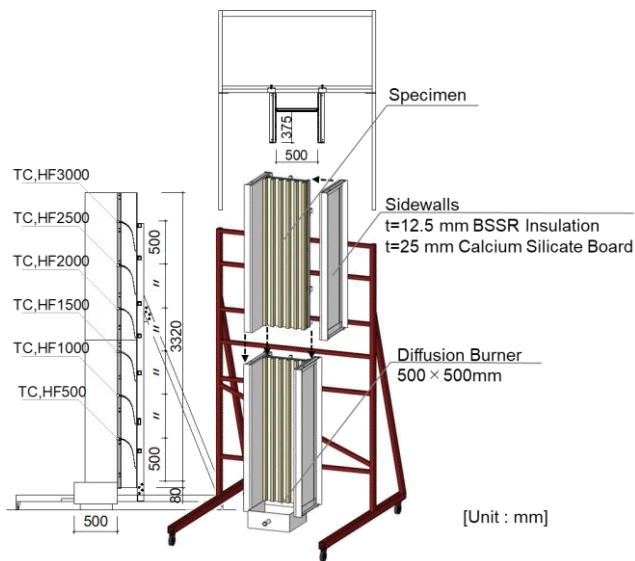


Fig.8 Testing Apparatus

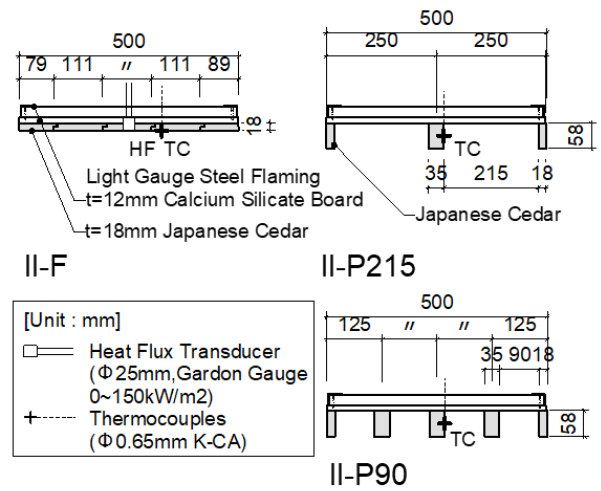


Fig.9a Test Specimens (Series-II)

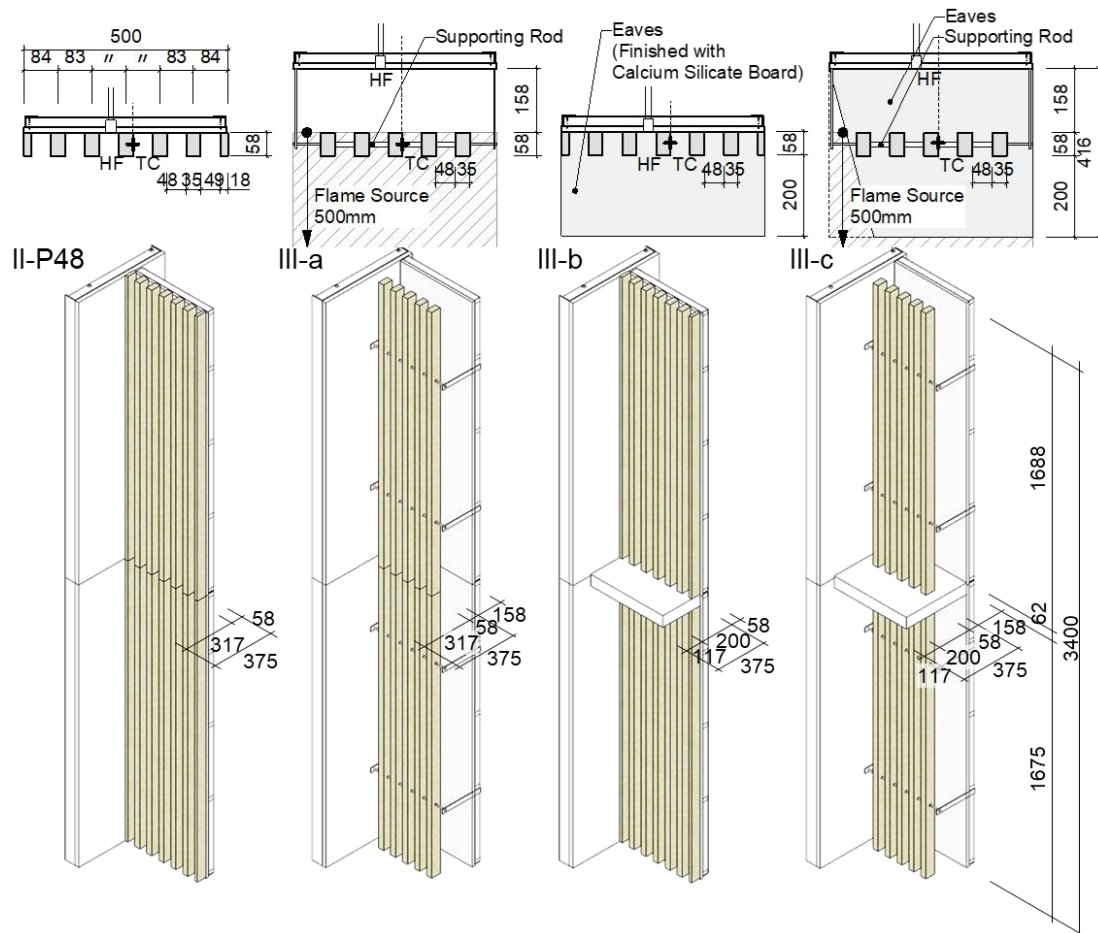


Fig.9b Test Specimens as Variations of II-P48

(2) 測定項目

熱電対は羽板側面の中央部の温度を、熱流計は後壁面への入射熱を計測するよう火源面から 500mm ごとの等間隔で計測した (TC-500, HF-500 などと表記する)。熱電対は素線径 0.65mm の K-CA 熱電対、熱流計は $\phi 25\text{mm}$ Gardon 型熱流束計 (測定レンジ 0~150kW/m²) を用いた。また、前節の要素実験と同じ要領で火炎高さを計測した。但し、火炎伝播速度が大きい時点ではインターバルを設けずに計測を継続した。燃焼ガスは 5m フードにて収集し、酸素消費法にて発熱速度を算出した。

(3) 試験体

Fig.9 に試験体を示す。シリーズⅡでは平面形状が燃焼性におよぼす影響を把握するために、平板および羽板の間隔を 3 通りに変化させたルーバーとした。羽板厚さは前章との比較の為、対称面からの距離が凡そ等しくなるように 35mm とした。試験体名はⅡ-P48 などと表記する。更にシリーズⅢは、ルーバーを床スラブ勝ちで納める状況などを想定して、Ⅱ-P48 を基に、底の有無と、後壁からの距離を変化させた 3 仕様とした。試験体名はⅢ-a などと表記する。材種は全てスギとした。

(4) 結果および考察

Fig.10-1 にシリーズⅡおよび仕様Ⅲ-a の発熱速度推移を示す。各々の仕様における発熱速度のピークから火源の平均発熱速度 195.5kW (ブランク試験により実測) を差し引いて、表面積との関係をプロットしたのが Fig.10-2 である。P90 までの発熱速度のピークは、単に表面積の増加率を考慮すれば推定可能であることが示唆された。一方でⅡ-P48 およびⅢ-a については、装置の上限によってピーク値がカットされているにもかかわらず大幅に発熱が増加しており、燃焼様態が変化していることが読み取れる。

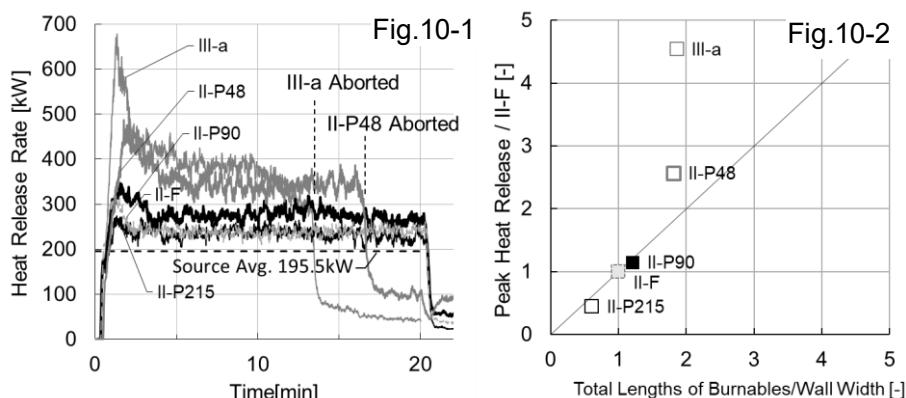


Fig.10 Heat Release of Specimens without Eaves

-1: heat release rate (fire source included)

-2: relationship between peak heat release (fire source excluded) and total lengths of combustibles.

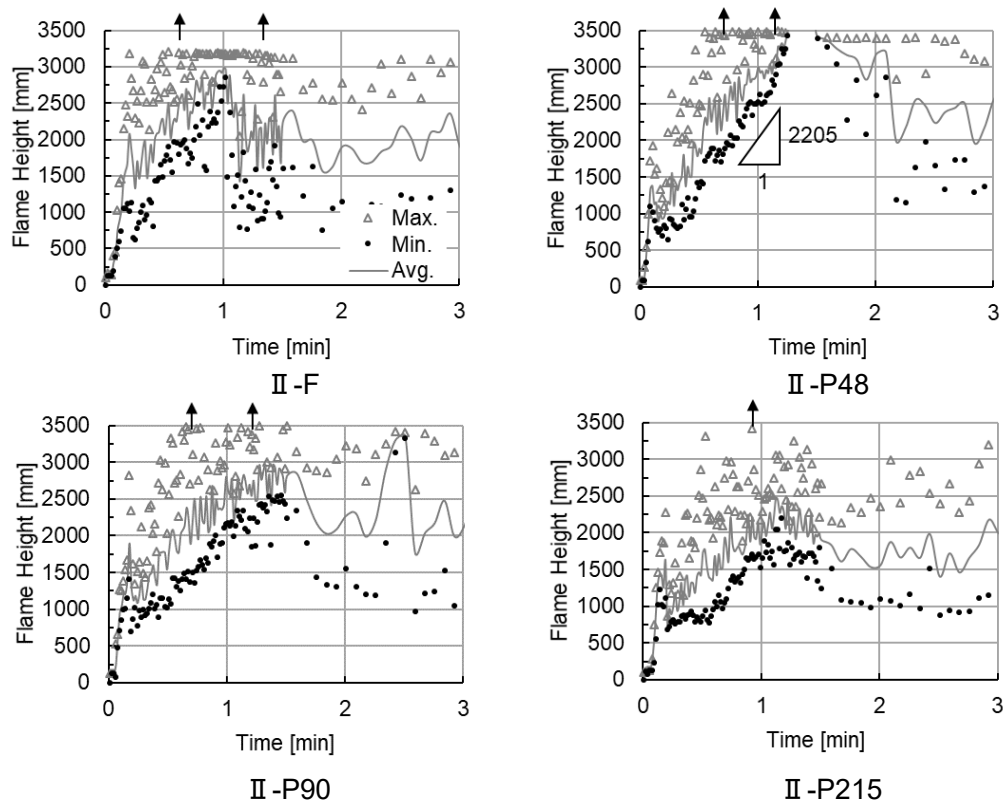


Fig.11 Flame Height in Full-scale Tests

Fig.11 に実験開始 3 分までの火炎高さの推移を示す。II-P48 に着目すると火炎高さは概ね直線的に増加しており、定性的には前章の小型実験における D54P48-2 の傾向と同様の結果になったが、火炎伝播速度は上端付近でも 2.2m/min と高い値を保った。これは小型実験 D54P48-2 で観測された値 (Fig.6 参照、 0.23m/min) の約 10 倍であり、少なくとも火源近傍では燃え止まらなると考えられる。このようなルーバーで燃焼を局限化するためには何らかの防火的措置が必要である。

Fig.12 に、各々の仕様において発熱速度が最大となった時点 (III-b は 1.7 分、III-c は 0.9 分) の状況を示す。後壁の有無に関わらず、出寸法 200mm の底は有効であったが、後壁ありの III-b では火炎が後壁方向に吸い寄せられているのが分かり、底の上方 500mm ほどの箇所に部分的な炭化および赤熱が認められた。一方で、後壁なしの III-c では、底上方の全体において健全であった。Fig.13 に各仕様の主要部分の温度推移を示す。上述した火炎の性状と同様に、III-b では最高 373°C (TC-2000, 1.4 分) に達しているのに対して、III-c では最高 199°C (TC-3000, 1.7 分) まで抑制された。羽板先端からの底の出寸法や、側壁との位置関係は仕様間で同一としてあるため、この主な要因には、ルーバー面の開口によって底上方のコアンダ効果が低減されたことが挙げられる。このとき、後壁面への入射熱は Fig.14 に示す通り、仕様 III-c では底直下で 150kW/m^2 を超えているが、底上方ではルーバーの遮蔽効果

も寄与して、最大でも 6.8kW/m^2 (HF-3000, 0.6 分) と低減されている。以上の通り、火災拡大防止のための底は、ルーバー架構において設置の効果が高いといえよう。ただし、底を設けたことによって底下にプルームが滞留して側方火炎伝播を生じる可能性もあるから、幅広の試験体を用いた検証を行って、このようなことが生じない底形状を検討する必要がある。

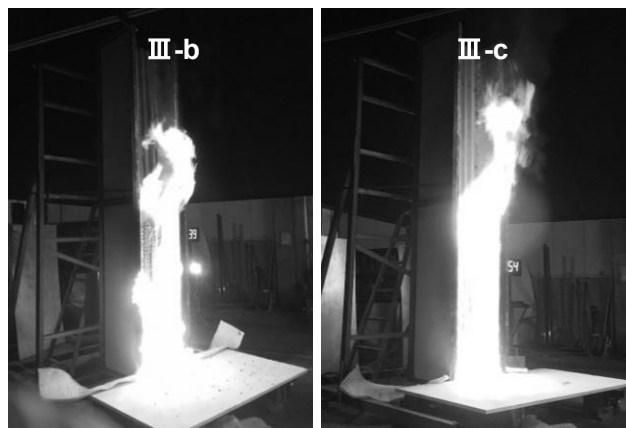


Fig.12 Comparison of Flame Trajectories

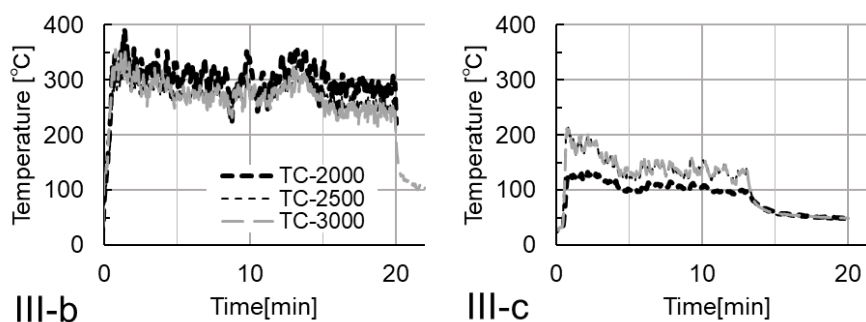


Fig.13 Surface Temperature of Specimens with Eaves

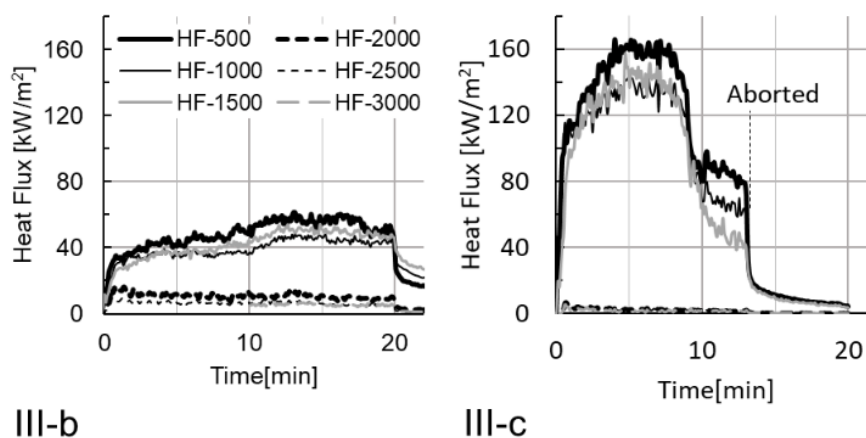


Fig.14 Heat Flux of Specimens with Eaves

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

本研究によって、鉛直ルーバーにおいて燃焼を局限化しうる平面形状の数例が明らかになり、小型実験でも火炎伝播の定性的な傾向が再現出来ることが分かった。更に、ルーバーに対する燃焼抑制措置には、開口噴出火炎から加熱を受ける状況と比較して、小さな出寸法の底でも有効に燃焼拡大を抑制できる見通しが得られた。

今後は、1次元火炎伝播実験のみならず、ある程度の幅を有する試験体を用いた検証によって底形状の合理化などの検討を進めていくことで、燃焼を局所に留められる構法を柔軟に提案できるようになると考えている。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

■ 口頭発表

- ① 鈴木健太郎、高瀬棕、上川大輔、松山賢、長谷見雄二、渡辺秀太：木質ルーバー壁面の燃焼性状及び防火的手法に関する実験的研究、日本建築学会関東支部発表梗概集、3013（2019.3）
- ② 高瀬棕、鈴木健太郎、上川大輔、松山賢、長谷見雄二：木質ルーバーで仕上げた壁面の燃焼性および火災安全手法(その1)羽板の要素実験による火炎伝播発生条件の把握、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)（2019.9 予定）
- ③ 鈴木健太郎、高瀬棕、上川大輔、松山賢、長谷見雄二：木質ルーバーで仕上げた壁面の燃焼性状および火災安全手法(その2)フルスケールの木質ルーバー壁面への火災初期加熱による燃焼性状の実験的把握、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)（2019.9 予定）

■ 原著論文

本成果については執筆中である。なお、平成29年度の共同利用研究『難燃処理木材の火災安全性に対する薬剤処理ムラの影響に関する検討（森林総合研究所）』の成果については下記の通り論文化して採択されたので、ここに報告する。

- ④ 高瀬棕、上川大輔、長谷見雄二、松山賢：難燃処理木材の板厚方向の薬剤分布が燃焼性状に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集 84(762), 2019年8月掲載予定

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
木材	129,600	該当なし		実験補助委託	324,000
不燃材	144,720				
小計	276,000	小計	0	小計	324,000

東京理科大学 負担分 総計 598,320 円

上記以外 森林総合研究所 負担分 総計 531,090 円

以上

※ページは適宜増やしてください。

※上記 5 に記載された成果公表については、別刷 1 部をご提出願います。PDF ファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告として Web 等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。（フォーマットは問いません。）

※後日開催予定の成果発表会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。