

初期火災における内装の燃焼拡大性状に関する研究

A study on flame spread over lining materials during early stage of fire

小宮 祐人*1、大上 尊子*2、原田 和典*3

1. はじめに

建築火災の初期拡大性状を考える上で、内装材料の燃え拡がりは重要な要素の一つである。しかし、現在国内で行われている内装材料の試験、評価はコーンカロリメーター（以下CCM）¹⁾を用いた発熱性に着目した方法であり、燃え拡がりに関する試験や評価は実績が少ない。ASTM E1321に規定されるLIFT試験²⁾は燃え拡がりに関する試験方法であるが、国内で実施できる機関はごく限られている。そこで筆者らは、CCM試験装置を利用した燃え拡がり測定方法を開発して「縮小LIFT試験」と呼び、その可能性を検討している³⁾。

CCMによる着火時間および発熱速度の測定、LIFT試験または縮小LIFT試験による火炎伝播速度の測定から得られる内装材料の熱物性値をQuintiereモデル⁴⁾等の燃え拡がり予測モデルに入力すれば、理論的には室の発熱速度を予測することができる。ただし、予測モデルの適用範囲や予測精度は実験によって確かめる必要がある。また、着火や燃え拡がりを予測する上では、半無限体近似が成り立つ「熱的厚壁」を仮定することが多いが、内装の表面材が燃え抜けたり熱伝導により裏面温度が上昇すれば裏面からの燃焼も起こるため、材料の厚さも重要な因子となる。

そこで本研究では、厚さの異なる合板を試験体としたCCM試験、縮小LIFT試験、ならびに室空間の一部を模擬した中規模区画実験を実施し、これらの相関について考察する。また、Quintiereモデルを一部改良した予測モデルにCCMおよび縮小LIFT試験で得られた物性値を用いて予測した結果と中規模区画実験結果を比較する。

なお、本稿は、既発表論文^{5),6),7)}および投稿済みの発表予定論文⁸⁾の内容を再構成し、考察を加えたものである。

2. 実験方法

2.1 CCM試験（着火性および発熱性試験）

本検討では、主として壁面（鉛直面）での燃焼を対象としているため、鉛直設置として表面に生じる気流の向きを壁と合わせた。装置レイアウトや口火位置などはISO 5660-1¹⁾のAnnex Eによった。加熱強度は、50kW/m²を上限として徐々に小さくし、着火限界付近では、着火する最小の加熱強度と着火しない最大の加熱強度の差が1kW/m²以下になるまで繰り返し測定を行ない、着火限界熱流束 $q''_{o,ig}$ を特定した。測定項目は着火時間および発熱速度とした。

2.2 縮小LIFT試験（燃え拡がり試験）

縮小LIFT試験装置の概要を図-1に、装置の写真を図-2に示す。縮小LIFT試験では、試験体左端からの距離 $x=50\text{mm}$ の位置がヒーターの中心となるように試験体を配置した。試験体とヒーターとの離隔距離は $d=100\text{mm}$ とした。燃え拡がり測定においては、加熱強度の分布は着火点から離れるに従ってなだらかに減少するのが望ましい。試験体とヒーターの離隔距離が大きいと、加熱強度（ヒーターの形態係数）がなだらかに減少するが、加熱強度の最大値も減少する⁹⁾。逆に、試験体とヒーターの離隔距離が小さいと、加熱強度の最大値は確保できるが、燃え拡がりの観察が困難になる。以上のことを考慮し、試験体とヒーターの離隔距離は、最大の加熱強度が着火に十分な値となる範囲で極力大きく設定し、試

*1 KOMIYA Masato : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐火部 防耐火構造・材料試験室 主査 修士(工学)

*2 OUE Takako : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐火部 防耐火構造・材料試験室

*3 HARADA Kazunori : 京都大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学)

試験体とヒーターは平行に設置した。このように調整した加熱強度の分布を図-3に示す。 $x=100\sim 250\text{ mm}$ の範囲で加熱強度が徐々に減少している。

CCM試験装置の集煙フードは、図-2に示すように試験体の大きさに合わせて拡張した。口火はメッセルバーナー（燃料はプロパンガス）とし、LIFT試験に倣って $x=10\text{ mm}$ に配置した。口火の長さは試験体下端から約 20 mm とし、口火のみの発熱速度は 0.27 kW であった。試験体寸法は $150\times 500\text{ mm}$ 、加熱範囲は $130\times 500\text{ mm}$ とした。測定項目は炎災到達時間とし、試験体および試験体ホルダーに 25 mm 間隔で描いた目盛りを基準として試験体の中心線上で測定した。また、CCM装置のガス分析計を用い、酸素消費法により発熱速度を測定した。

試験は厚さごとに2回ずつ実施した。

2.3 中規模区画実験

約 1.8 m 立方の室隅角部および天井、垂れ壁を模擬した試験体を組み立て、隅角部に火源を設置した。試験体を図-4に示す。火源はプロパンガスバーナーとし、発熱速度は、天井に間欠火災が届く程度を目標に 50 kW とした。隅角を挟む壁の対面（2面）は開口とし、開口の上部に区画の半分ほどの高さの垂れ壁を設けた。隅角を挟む壁の内装を試験体（可燃材）とし、裏打ち材および天井および床面、開口側の垂れ壁はケイ酸カルシウム板とした。測定項目は、発熱速度、区画内温度、壁面入射熱、煙層の酸素濃度とし、燃え広がり状況を目視及びビデオカメラで記録した。

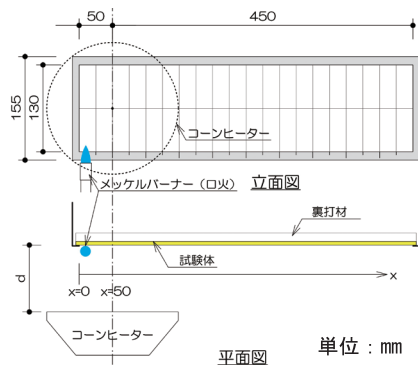


図-1 縮小LIFT試験装置図

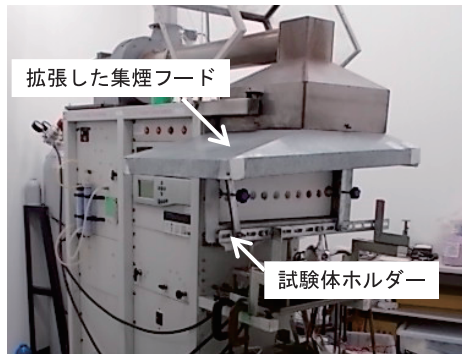


図-2 縮小LIFT試験装置の写真

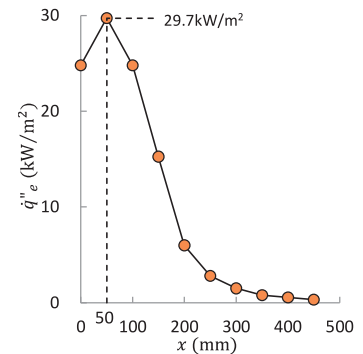


図-3 縮小LIFT試験の加熱強度

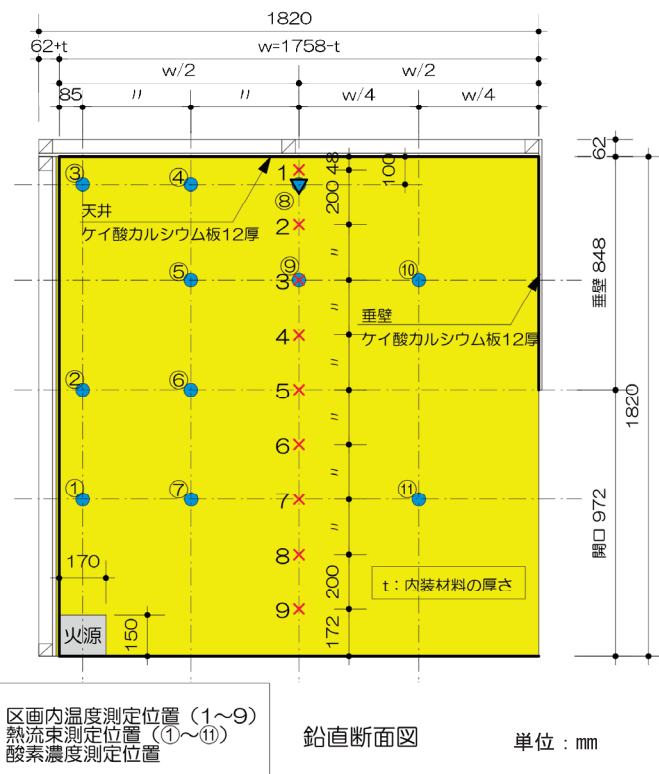
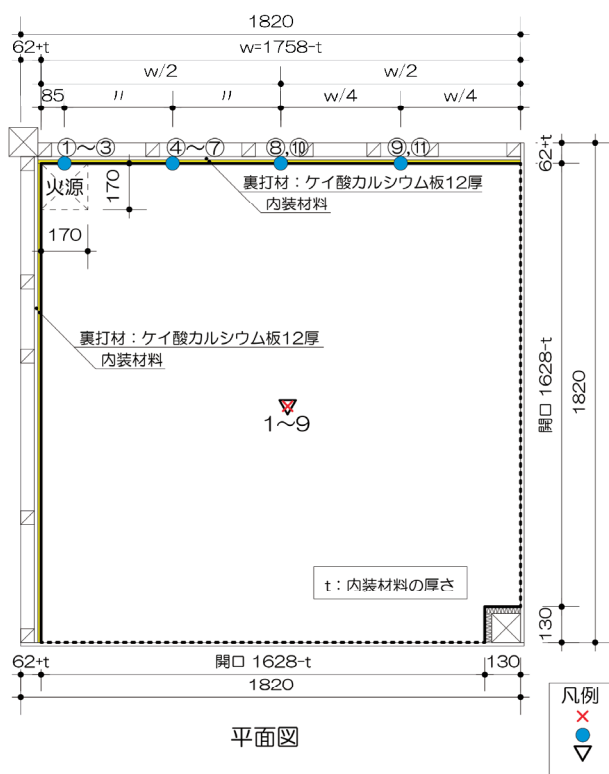


図-4 中規模区画実験の試験体および各種測定位置

3. 試験体

試験体はラワン合板とし、厚さは5.5, 9, 12, 30mmとした。CCM試験、縮小LIFT試験および中規模区画実験ともに共通の材から試験体を製作した。その中から採取したサンプルにより測定した密度および含水率(105℃全乾法による)を表-1に示す。

表-1 試験体の密度および含水率

記号	厚さ (mm)	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
PW5.5	5.5	460	10.33
PW9	9	522	10.24
PW12	12	602	8.74
PW30	30	574	10.76

4. 実験結果

4.1 CCM試験の結果

加熱強度25kW/m²を例に、発熱速度の推移を図-5に示す。着火直後に発熱速度が増大し第1ピークが発現した後、一時的に減少し、PW5.5は着火後約1分40秒、PW9は着火後約6分30秒、PW12は着火後約7分30秒で裏面の燃焼に伴う第2ピークが発現した。PW30は12分で実験を終了するまで第2ピークは発現しなかった。ちなみに、PW30の加熱強度50kW/m²の場合には着火から第2ピーク発現まで約24分であった。

加熱強度と着火時間の関係を図-6に示す。加熱強度が20kW/m²以下ではPW9の着火時間が比較的長くなったが、他の厚さでは近い結果を示した。加熱強度が25kW/m²以上の範囲ではいずれの厚さも近い結果であった。着火限界熱流束 $\dot{q}''_{o,ig}$ はPW5.5とPW9が13.5kW/m²と比較的小さく、PW12は16.5kW/m²、PW30は15.5kW/m²であった。図-6の結果について、横軸を着火時間の平方根 $\sqrt{t_{ig}}$ 、縦軸を着火限界熱流束と加熱強度の比 $\dot{q}''_{o,ig}/\dot{q}''_e$ として整理した結果を図-7に示す。熱慣性 $\sqrt{k\rho c}$ はASTM E1321の方法により図-7の原点付近の回帰直線の傾きから求めた²⁾。

加熱強度と着火後3分間の平均発熱速度の関係を図-8に示す。PW5.5が他の厚さに比べて大きな値となっているのは、着火後3分間で裏面からの燃焼が始まっているためである。PW9では、加熱強度が25kW/m²以下の領域で加熱強度が小さくなるにつれ平均発熱速度が大きくなっている。これは、加熱強度が小さいと着火時間が長くなり、着火時点ですでに裏面付近まで予熱されたため第1ピークと第2ピークが近接するためと考えられる。PW12とPW30はおおよそ近い結果を示した。

実験結果から得られたパラメータの一覧を表-2に示す。表-2の結果は5章の燃え拡がり予測に用いられる。

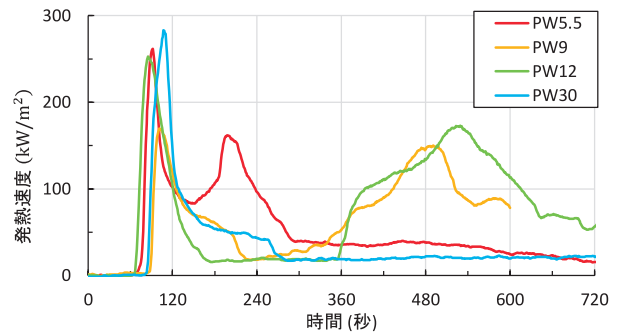


図-5 発熱速度の推移 (加熱強度25kW/m²)

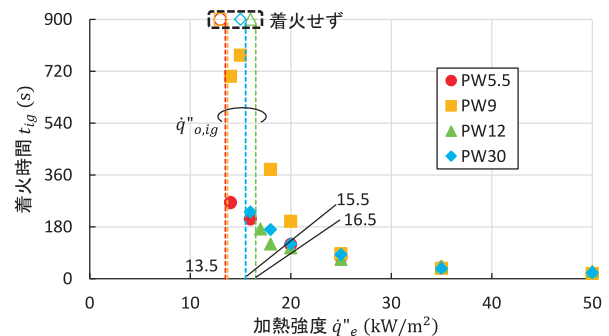


図-6 加熱強度と着火時間の関係

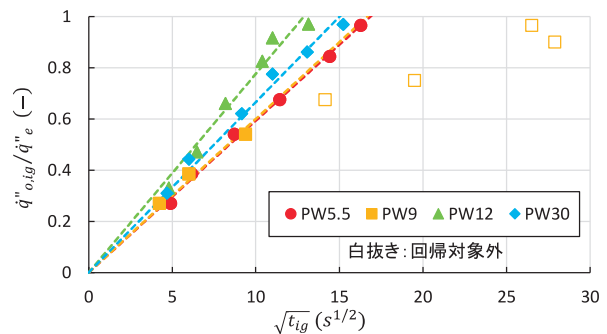


図-7 $\sqrt{t_{ig}}$ と $\dot{q}''_{o,ig}/\dot{q}''_e$ の関係

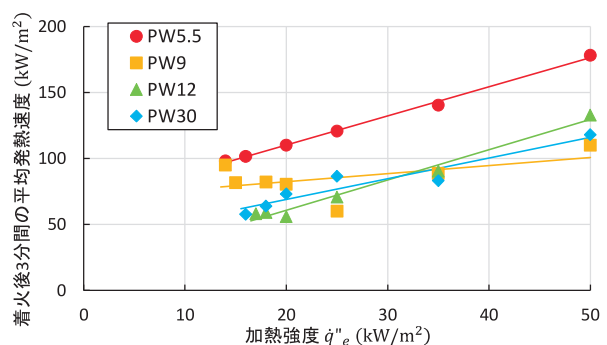


図-8 加熱強度と着火後3分間の平均発熱速度の関係

表-2 CCM試験結果から得られたパラメータ

記号	$\dot{q}''_{o,ig}$ kW/m ²	T_{ig} °C	$\sqrt{k\rho c}$ kW·s ^{1/2} /(m ² ·K)	$\Delta H/L$ -	\dot{q}''_{fl} kW/m ²	Q'' MJ/m ²
PW5.5	13.5	366	0.743	2.21	39.9	52.8
PW9	13.5	366	0.735	0.62	126.4	82.3
PW12	16.5	404	0.625	2.30	19.4	118.2
PW30	15.5	392	0.706	1.57	36.9	277.7

4.2 縮小LIFT試験の結果

各観測点への火炎到達時間を図-9に示す。火炎到達時間はPW5.5, PW12に比べてPW9, PW30が若干早く、火炎伝播停止位置までの距離はPW12が他の厚さよりも長かった。火炎伝播速度 V と加熱強度 \dot{q}''_e の関係は、熱的厚壁を仮定すると、式(1), (2)が成り立つ²⁾。

$$1/\sqrt{V} = \sqrt{\frac{k\rho c}{h^2\phi}} (\dot{q}''_{o,ig} - \dot{q}''_e F(t)) \dots\dots\dots (1)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left(\frac{h^2 t}{k\rho c}\right) \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{h^2 t}{k\rho c}} \dots\dots\dots (2)$$

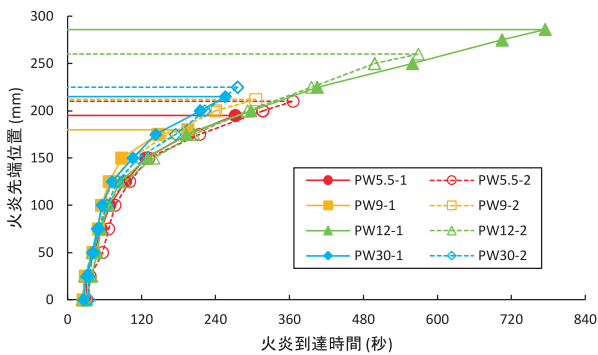


図-9 各観測点への火炎到達時間

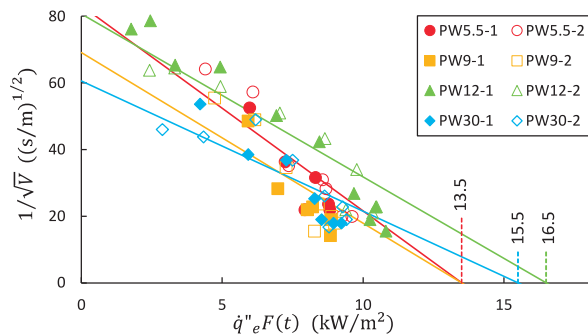


図-10 有効加熱強度と火炎伝播速度の平方根の逆数の関係

表-3 火炎伝播パラメータと火炎伝播最小熱流束

記号	PW5.5		PW9		PW12		PW30	
No	1	2	1	2	1	2	1	2
ϕ ((kW) ² /m ³)	9.5		13.5		8.8		18.8	
$\dot{q}''_{o,s}$ (kW/m ²)	6.9	5.4	10.9	6.3	1.9	2.5	5.0	4.4
	(6.1)		(8.6)		(2.2)		(4.7)	

カッコ内の数値は平均値を示す。

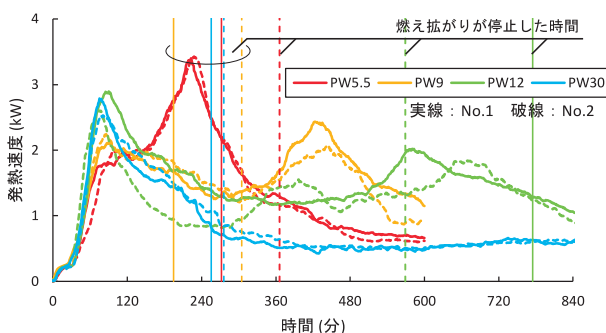


図-11 発熱速度の推移

有効加熱強度 $\dot{q}''_e F(t)$ と火炎伝播速度の平方根の逆数の関係を図-10に示す。厚さごとに回帰直線の傾きと表-3に示す熱慣性を用いて火炎伝播パラメータ ϕ を求めた。また、火炎伝播停止位置での加熱強度から火炎伝播最小熱流束 $\dot{q}''_{o,s}$ を求めた。結果を表-3に示す。火炎伝播パラメータは燃え拡がりの早かったPW9とPW30で比較的大きな値となった。PW12は火炎伝播停止位置までの距離が大きかったため、火炎伝播最小熱流束は小さくなった。

発熱速度の推移を図-11に示す。PW5.5では、220秒程でピークが発現しており、その後火炎伝播が停止するに従って発熱速度が減少した。PW9, PW12, PW30では、90秒程でピークが発現するまでの推移はおおよそ一致したが、PW9, PW12は240秒程から緩やかに上昇した。PW30は火炎伝播が停止する過程で発熱速度が減少した。PW9は430~450秒で、PW12は580~680秒で第2ピークが発現した。PW5.5のピークとPW9, PW12の第2ピークは裏面の燃焼に伴うものと考えられる。

4.3 中規模区画実験の結果

2.3節で示した実験条件による内装への加熱性状を把握するため、合板を設けないブランク測定を実施した。その結果について、おおよそ定常状態に至った加熱開始

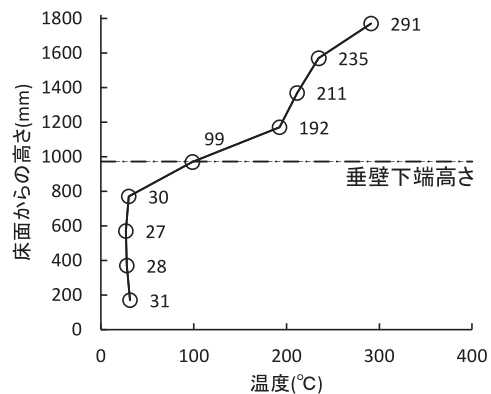


図-12 高さ方向の温度分布

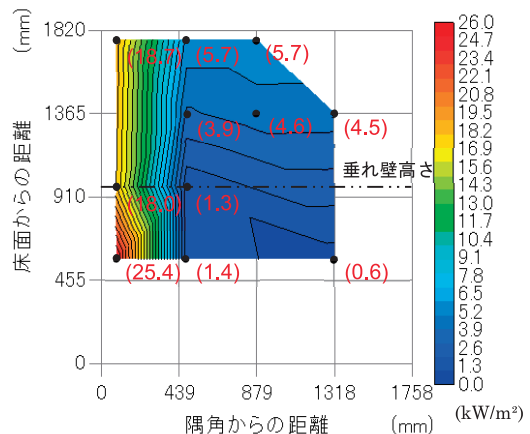


図-13 壁面入射熱流束の分布

後6分時の高さ方向の温度分布を図-12に、壁面入射熱流束を図-13に示す。垂れ壁下端（床面からの高さ972mm）より下では30℃程度であるが、垂れ壁下端より上では煙が滞留し、垂れ壁下端で99℃、煙層内部では天井に近づくほど温度が高くなり天井付近で291℃であった。壁面入射熱流束は、火源の直上は18.0～25.4kW/m²であったが、火源から300mm以上離れる

と同じ高さではおおよそ近い値を示した。高さごとに入射熱の比較をすると、垂れ壁下端高さから上は天井に近づくほど高くなり、垂れ壁の中段で3.9～4.6 kW/m²、天井付近で5.7 kW/m²であった。垂れ壁下端高さより下では1kW/m²程度であった。

以下、壁面に合板を設けた場合の結果を示す。燃え拡がり状況を表-4に示す。

表-4 燃え拡がり状況

時間	PW5.5	PW9	PW12	PW30
0分				
4分				
6分				
11分				
15分				
17分				
18分30秒			(実験終了)	
20分		(実験終了)		
22分				

PW5.5では、2分頃から火勢が増し、4分時には壁の中央付近まで水平に展炎した。約6分から展炎が収まり、隅角部で炭化した合板が脱落していた。その後は緩やかに側方へ燃え広がっているが、それ以上の目立った燃え広がりには観察されず、火炎伝播が停止したことを確認した上で、25分で実験を終了した。

PW9, PW12, PW30では、4分頃まではPW5.5と同様な推移であったが、以降も展炎は継続した。PW9, PW12では11分時に、PW30では17分時に火炎プルームへの巻き込み空気が煙層下端に貫入する位置における燃焼が確認された。3~4分でこれが拡大し、煙層下端に沿って延焼した。延焼が開口まで達するとその後は上下方向に急速に燃焼が拡大し、PW9は18分40秒、PW12は17分30秒、PW30は23分でフラッシュオーバー

バーに至ったため実験を終了した。

区画内温度の推移を図-14に、発熱速度の推移を図-15に示す。プランク測定の結果と比較すると、いずれの試験体も1~2分で区画内温度および発熱速度が急激に上昇しており、この時点で合板表面に着火したと考えられる。PW5.5は約6分まで区画内温度、発熱速度とも上昇し、ピーク発現後は実験終了まで緩やかに下降した。CCM試験においては、PW5.5は着火後約2分で裏面までの燃焼に至っており(図-5)、約6分時までの区画内温度および発熱速度が他の試験体よりも高くなったのは合板裏面の燃焼に起因し、その後燃え尽きたためと考えられる。PW9とPW12は区画内温度、発熱速度とも同様の推移を示している。着火後区画内温度は300℃程度、発熱速度は100kW程度で停滞しているが、約7分から再度増大している。CCM試験で裏面が燃焼に至るまでの時間はいずれも7分前後であり、区画内温度、発熱速度増大のタイミングとおおよそ一致するため、これも裏面の燃焼によると考えられる。PW9は約7分での増加の直後に一時的に停滞しており、この時点から燃え尽きは始めていると考えられる。PW12のほうが厚い分燃え尽きが遅いため、約8分以降はPW9との大小関係が逆転している。PW9は約16分、PW12は約14分以降煙層下端での延焼によって燃焼が拡大し、区画内温度、発熱速度とも急激に増大してフラッシュオーバーに至った。PW30は、区画内温度と発熱速度が停滞するまではPW9, PW12と近い推移を示した後、約14分時まで区画内温度と発熱速度が緩やかに下降した。その後増大してフラッシュオーバーに至ったが、実験終了時も合板裏面は燃焼(炭化)していなかった。そのため、PW30では裏面の燃焼ではなく、煙層からの予熱によって熱分解が進み、燃焼拡大に至ったと考えられる。

酸素濃度の推移を図-16に示す。プランク測定ではバーナー点火直後から急激に減少し、約16%で一定となった。PW9, PW12, PW30では表面に着火した1~2分でプランク測定の酸素濃度を下回り、10~13%程度で推移した。その後、燃焼拡大に伴ってさらに減少した。煙層内は高温にはなるものの酸欠により燃焼しにくい状況であったと推察される。

5. 燃え広がり予測

5.1 予測方法

燃え広がり予測は、Quintiereモデル⁴⁾を一部改良した方法¹⁰⁾により行った。図-17にその概略を示す。計算条件は中規模区画実験と同じとし、合板の厚さは5.5, 9,

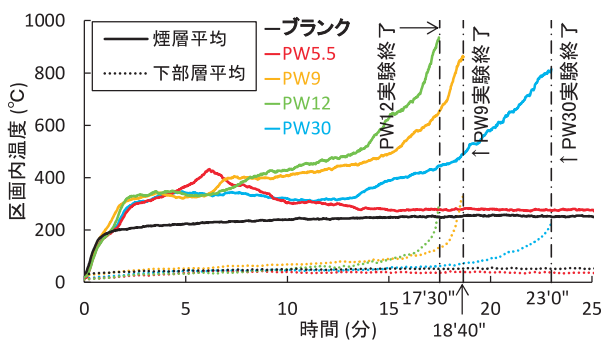


図-14 区画内温度の推移

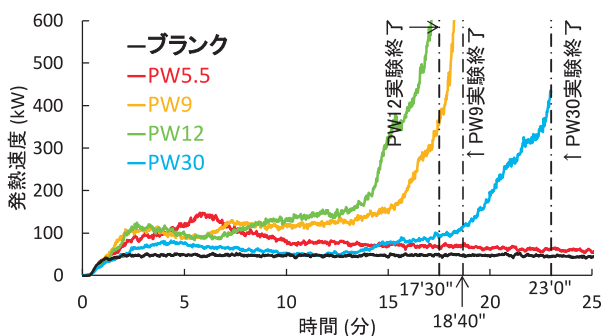


図-15 発熱速度の推移

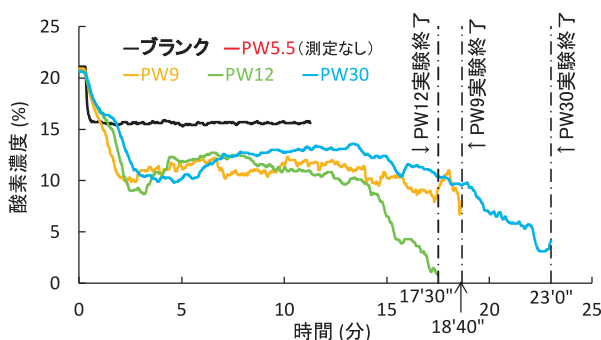


図-16 煙層の酸素濃度の推移

12 および 30mm とした。ΔH/L、 Q'' 、 T_{ig} 等の物性値は 4 章の CCM もしくは縮小 LIFT 試験結果から与えた。ここでは各厚さでの測定値の平均とし、単位面積あたりの総発熱量 Q'' のみ各厚さでの値を 60% に低減した値とした。

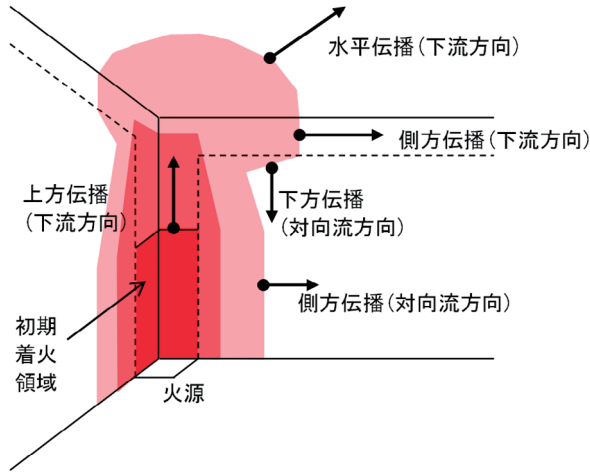


図-17 Quintiere モデルの概要

5.2 予測結果と考察

計算結果を図-18~20に示す。図-18に示す燃焼面積より、5.5mmの場合には初期着火領域から上方（および天井下に流下方向）にのみ燃え拡がり、最初に着火した部分から順次燃え尽きた。しかし、9~30mmでは約9分から側方および下方への燃え拡がりがあり、燃焼面積が増加した。これに伴い、図-19に示す発熱速度、図-20に示す火災室温度が急激に増加し、9mmでは約11分で初期着火領域から燃え尽きが始まっているものの、9~30mmはフラッシュオーバーに至った。合板が薄いと早期に燃え尽きて燃焼面積が限定されるが、厚いと燃焼面積が大きくなり燃焼が激しくなる傾向は中規模区画実験と同様である。ただし、燃え拡がりの推移は中規模区画実験よりも早く、実験との定量的一致は改良の余地がある。

6. まとめ

厚さの異なる合板を試験体として、小規模試験（CCM試験および縮小LIFT試験）および中規模区画実験を実施した。また、小規模試験で得られた物性を用い、中規模区画実験と同じ条件でQuintiereモデルにより燃え拡がり性状を予測した。本研究の成果を以下にまとめる。

(1) CCM試験から着火性と発熱性に関する燃焼物性を、縮小LIFT試験から燃え拡がりに関する燃焼物性を取得した。これらの物性値を用いて室の燃え拡がりを予測し、区画実験により検証する道筋を示した。

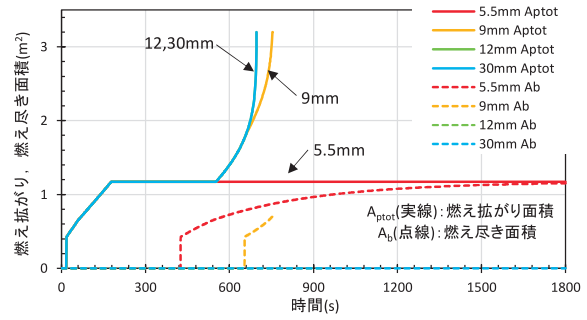


図-18 燃え拡がり面積および燃え尽き面積

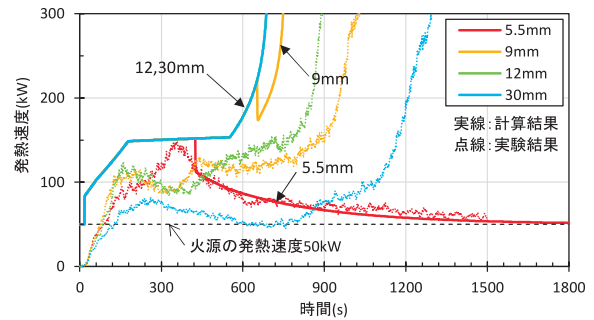


図-19 発熱速度

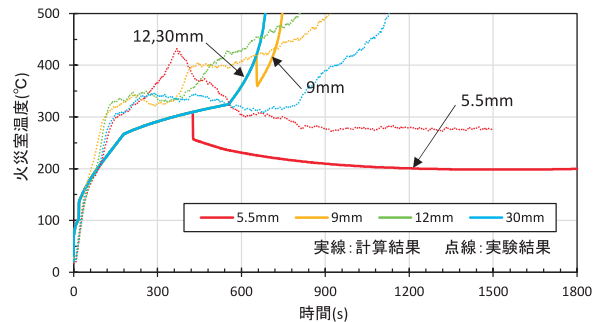


図-20 火災室温度

- (2) 中規模区画実験において、厚さ9mm以上の合板を壁面内装とした場合に、煙層下端に沿った延焼により急速に燃焼が拡大し、フラッシュオーバーに至った。
- (3) 裏面の燃焼が燃え拡がり性状に及ぼす影響を考察した。合板が薄いと裏面が早期に燃焼するため、一時的に燃焼が旺盛になるが、燃え尽きも早い。本研究の実験では厚さ12mmの合板が他の厚さに比べて裏面の燃焼により燃え拡がりが促進されることを示した。
- (4) 煙層内は高温にはなるものの酸素濃度はおよそ10%と低くなっており、酸素欠により燃焼しにくい状況であることが示唆された。
- (5) 燃え拡がり予測計算により、合板が厚い場合に燃え拡がりが激しくなり、フラッシュオーバーに至る傾向を再現した。

記号

\dot{q}''_e : 加熱強度 [kW/m²], t_{ig} : 着火時間 [s], $\dot{q}''_{o,ig}$: 着火限界熱流束 [kW/m²], T_{ig} : 着火温度 [K], $\sqrt{k\rho c}$: 熱慣性 [kW·s^{1/2}/(m²K)], $\Delta H/L$: 燃焼熱と熱分解潜熱の比 [-], \dot{q}''_{fl} : 燃焼炎から材料表面への入射熱 [kW/m²], Q'' : 総発熱量 [MJ/m²], Φ : 火炎伝播パラメータ [(kW)²/m³], $\dot{q}''_{o,s}$: 火炎伝播最小熱流束 [kW/m²]

謝辞

本研究に関わる実験の実施に際し、(株)東亜理科の皆様並びに防耐火構造・材料試験室の防火材料メンバーにご協力をいただいた。また、燃え拡がり予測計算に際し、京都大学の仁井大策先生、池松由良氏にご協力をいただいた。記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) ISO 5660-1 Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate
- 2) ASTM E1321 Standard test method for determining material ignition and flame spread properties, 2002
- 3) M. Komiya et al., Comparison of Flame Spread Measurement Using Cone Calorimeter and LIFT Apparatus, AOSFST 2021, Brisbane, Australia, 7-9 December 2021
- 4) J. G. Quintiere: A Simulation Model for Fire Growth on Materials Subject to a Room-Corner Test, Fire Safety J., 20, pp.313-339, 1993
- 5) 大上尊子ほか、内装材料の初期火災拡大性状に関する測定方法の検討－中規模区画実験の概要とブランク測定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、防火、pp.5-6, 2020年9月
- 6) 小宮祐人ほか、内装材料の厚さと初期火災拡大性状に関する検討－中規模区画火災実験の結果－、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、防火、pp.11-14, 2020年9月
- 7) 小宮祐人ほか、内装材料の燃え拡がり測定における材料厚さおよび裏打材の影響に関する検討、日本火災学会研究発表会梗概集、pp.1-2, 2021年5月
- 8) 小宮祐人ほか、初期火災における内装の燃焼拡大性状に関する研究－小規模試験結果を用いた燃え拡がり予測と中規模区画火災実験の比較－、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、防火、2022年9月（投稿済、発表予定）
- 9) 原田和典ほか、縮小LIFT試験装置による内装材料の燃え拡がり測定 その2 縮小LIFT試験方法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.355-356, 2018年9月
- 10) 池松由良ほか、Quintiereモデルによる内装材料の燃え拡がり予測、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp.759-760, 2021年9月

【執筆者】



*1 小宮 祐人
(KOMIYA Masato)



*2 大上 尊子
(OUE Takako)



*3 原田 和典
(HARADA Kazunori)