

グリーンビルディングの火災安全に関する研究

鍵屋 浩司

省エネルギーや省資源、低炭素化などの環境負荷低減や健康に配慮した建築物「グリーンビルディング」の火災安全性について、中高層ビルの省エネを目的に普及しているダブルスキンや、木材の利用促進を背景に普及が進んでいる木質内装を取り上げて、これらに懸念される火災安全上の課題について実験的な検討を行い、今後の火災安全に配慮した設計や技術基準に資する知見をとりまとめた。

キーワード：グリーンビルディング、ダブルスキン、木質内装、上階延焼、排煙、フラッシュオーバー

1. はじめに

近年、地球温暖化をはじめとする環境問題を背景に、持続可能な社会の構築に向けた建築の考え方として「グリーンビルディング」が世界的に普及している。これは省エネや省資源、低炭素などによる環境負荷低減や健康に配慮した建築物といわれており、その要素として従来の建築とは異なる空間や設備、構法、材料などが積極的に使われている。その一方で、これらの火災時の挙動に関する想定が十分になされていない可能性も考えられる。

そこで、グリーンビルディングの火災安全に関する懸念の中で、影響が大きいと考えられる課題として、ダブルスキンと木質内装を取り上げ、設計段階で火災時の安全性を適切に評価する手法の開発を目的とする研究について、以下に紹介する。

2. 研究の背景と目的

2.1 グリーンビルディングと火災安全

グリーンビルディングの定義は現在のところ国際的にも統一されておらず、国によってその解釈は異なっているもの、おおむね「環境や人に優しい建築」という解釈となっている。たとえば、米国環境保護庁(EPA)によると [1]、「エネルギー、水、その他資源を効果的に使い、廃棄物や汚染・環境劣化を削減し、居住者やビル内で働く人の健康と生産性を高めることにより、環境や人体への負荷を削減するよう設計された建築」とされている。

「グリーンビルディング」という言葉は1990年頃から欧米で使われるようになったもので、もとは1980年

代後半の原油価格高騰により、省エネを指向した建築物を指していたが、その後、地球環境問題やQOL(生活の質)への意識の高まりといった社会動向を背景に、意味するものが多様化したものと考えられる。

グリーンビルディングの要素には、自然エネルギーなどの再生可能エネルギーの活用や新素材による断熱性の向上、設備機器の技術革新などによる省エネルギー、木材などの自然素材の利用、リサイクル材の活用などがある。

具体例として、建築空間の高断熱化のためのさまざまな断熱材の開発、煙突効果による自然換気を活用したダブルスキンや高層建築のアトリウムのようなボイド空間、ヒートアイランド対策のための屋上・壁面緑化、建築物の内外装における木材などの自然素材の活用、屋根や外壁一体型の太陽電池や燃料電池のための水素や、バイオマス発電のための木質ペレットなどの燃料が挙げられる。

しかしながら、グリーンビルディングに用いられる要素の中には、それらが建築物に導入されたときに建築物全体での火災安全性について明確になっていないものもある。火災安全の観点から出火源や収納可燃物、煙の拡大経路、延焼拡大の経路となる可能性も指摘され、環境性と火災安全性の双方を損なわずに両立させることが国際的な課題となっている [2]。

2.2 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究ではダブルスキンと木質内装を取り上げた。省エネ効果のあるダブルスキンについては、その構造上、煙の拡大経路や延焼拡大の経路となる可能性がある。木質内装については、目に見えるかたちで内装を木質化する需要に対して、それが室内の延焼拡大を著しく促進する可能性が見込まれるが、これらが発生しうる条件は明確でない。

そこで、火災時に想定されるこれらの問題を模型・実大スケールで実験して、その火災安全性に対する影

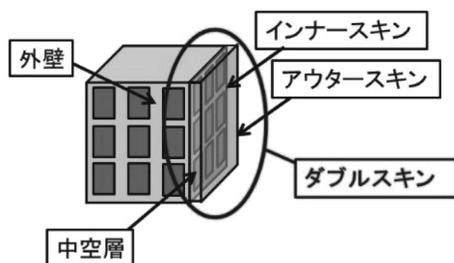


図1 ダブルスキンの構成

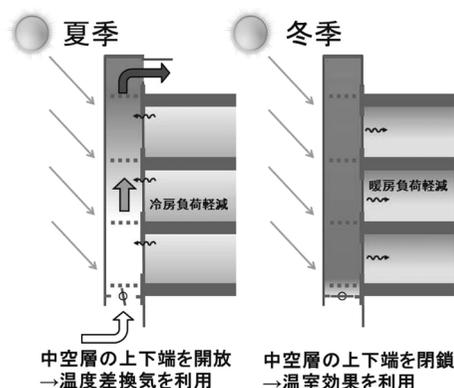


図2 季節によるダブルスキンの中空層の働き

響や対策を設計段階で検討できるようにするための評価手法を開発する。

3. ダブルスキンの火災安全性の評価に関する実験的検討

3.1 ダブルスキンの火災安全性に関する課題

ダブルスキンとは、ビルの外壁の外側に隙間（中空層）を空けてガラスのカーテンウォールを設けたものであり、外壁部分をインナースキン、その外側のカーテンウォールの部分をアウトースキン、これらを合わせてダブルスキンと呼んでいる（図1）。

夏季を中心に日射により中空層内で温められた空気の上昇気流（煙突効果）による自然換気を行い、冬季は中空層内の空気の流れを止めて日射による温室効果（図2）を利用してビルの空調負荷の軽減を図るもので、たとえば年間15%前後の省エネにつながると言われている。

ダブルスキンの中空層は、煙突効果や温室効果によって空調負荷の軽減に効果がある。しかし、中空層が複数層にわたって連続した堅穴を形成している場合、火災時にはこの煙突効果によって火災室からビル全体への煙の拡大経路となるほか、火災室から噴出した火炎

表1 ダブルスキンの中空層の厚さと高さ

中空層の高さ	中空層の厚さ (mm)					
	0~300未満	300~600未満	600~900未満	900~1200未満	1200~1500未満	1500~1800未満
単層	3*	4	2*			1
複数層2層	1		3**			
3層			1			
4~6層						
7層以上		1	3		1**	

*ほかと重複あり（1件）、**グレーティングによる仕切りを含む

表2 ダブルスキンを構成するガラスの種類

アウトースキン	インナースキン		単板ガラス		合わせ	複層ガラス	その他
	10 mm未満		10 mm以上		ガラス (Low-Eなど)		
単板ガラス	10 mm未満	1*					2
	10 mm以上	3	1*				10*
合わせガラス							2
複層ガラス (Low-Eなど)					1		
その他							1

*ほかと重複あり（2件）

が上方に伸びやすくなり、一般的なビルと比べて上階への延焼を促進する可能性が考えられる。

そこで、本研究の実験条件設定の根拠にするために、実際に施工されたダブルスキンの中空層の厚さや中空層の高さ（中空層が何層にわたって連続した堅穴が形成されているか）、ダブルスキンに用いられるガラスの種類などについて調査した。

調査方法は、（一社）日本建設業連合会の耐火構造研究会委員を対象に、委員各社が設計・施工したダブルスキンのガラスの種類や中空層の厚さなどの仕様に関するアンケート調査である。回答が得られた19物件について以下に結果を示す。

3.1.1 中空層の厚さと高さ

中空層の厚さは600 mm以上900 mm未満が最も多く、次いで300 mm以上600 mm未満だった。中空層は主に単層で区切られており、次いで2層で区切られているものが多かった。ダブルスキンの上端から下端まで一体の堅穴を形成しているものは5件（全体の1/3）見られた（表1）。

3.1.2 ガラスの種類

アウトースキンのガラスは、ほとんどが単板ガラスだった。インナースキンについては、複層ガラス（Low-Eなど）が最も多く、次いで単板ガラスだった（表2）。

このLow-E複層ガラスは、ガラスを複層にすることで断熱性を高め、さらにガラス表面に金属膜を付けて熱（赤外線）を反射させて夏の日射熱の侵入を防ぐほか、冬の室内からの熱の放出を防ぐことで、省エネ効果を高めたものである（図3）

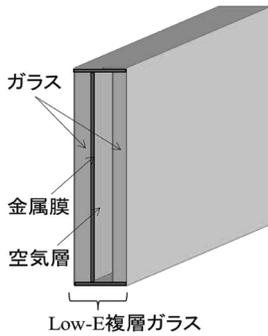


図3 Low-E 複層ガラスの模式図

表3 ダブルスキンの外気・中空層・室内間の換気方法

室内・ 中空層間換気	外気・中空層間換気		
	常時開放	常時閉鎖	その他・ 無回答
自然換気	11		1*
機械換気	2	2	2**
その他・無回答	1		

*数カ月ごとに閉鎖,**外気・中空層間換気を制御しているもの 1 件を含む

3.1.3 ダブルスキンの換気方式

多くは中空層が外気に対して常時開放されていた。中空層と室内との換気方法は自然換気が主流だった。中空層が外気に対して常時閉鎖されているものは2件あり、いずれも室内との換気方式は機械換気だった(表3)。

3.2 ダブルスキンを通じた煙の侵入

火災の煙が中空層内に流入すると、煙突効果によって火災階より上階の居室に換気口などの開口部を通じて急速に煙が侵入して避難上支障をきたす可能性がある。

そこで、ダブルスキンが設けられた建物における火災時の煙流動性状を把握し、避難安全上配慮すべきダブルスキンの設計仕様を明らかにすることを目的として、ダブルスキンが上階への煙伝播に及ぼす影響を把握するための模型実験を行った。

ダブルスキンを有する事務所ビルを縮率1/10で再現した実験により、火災室からダブルスキンの中空層を通じた煙流動を予測するための計算法を構築した(図4, 図5)。

さらに模型実験の結果、中空層内における煙突効果に伴う圧力の影響によって、火災室から上階になるほど中空層から換気口を通じて煙が室内に侵入する可能性があることがわかった。

特に、ダブルスキンの中空層頂部にひさし状の雨仕舞い(図4右上)がある場合、中空層を上昇した煙が最上階付近の階に滞留し、さらに煙突効果に伴う圧力の影響で換気口を通じて室内に煙が侵入する可能性

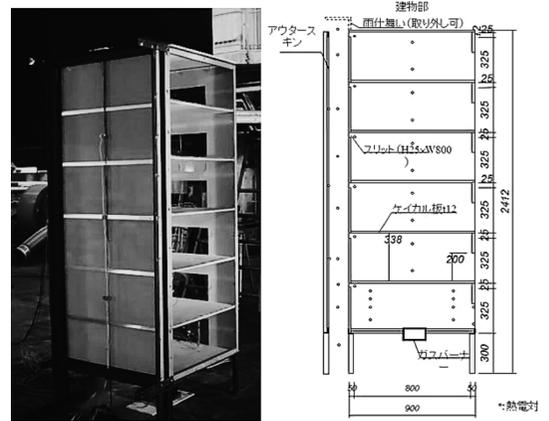


図4 煙流動実験に用いたビルの模型

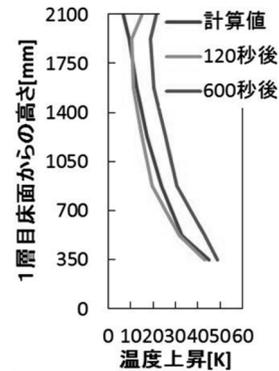


図5 模型実験による中空層内の温度と計算値との比較

あるため、火災時には火災報知器と連動して空調を停止するなどして、不用意に換気口などの開口部から室内に煙が流入しないようにすることが考えられる。

また、ダブルスキンを排煙として活用するには、ダブルスキンの上端部を居室より十分高くして、中空層の中性帯(煙が滞留する境目)を最上階の居室の換気口よりも上に位置させる、もしくは中空層の厚さを厚くして中空層の容積を増やし、火災室からの煙を十分希釈することが考えられる。

3.3 ダブルスキンによる上階への延焼促進

ダブルスキンの中空層内に火災室から火炎が噴出すると、中空層内の煙突効果に伴う上昇気流によって、火炎が上方に伸びやすくなり、一般的なビルと比べて上階への延焼を促進する可能性がある(図6)。

これは、ダブルスキンを構成するガラスの脱落時間が関係している。すなわち、インナースキンのガラスが脱落して中空層に火炎が噴出したときにアウトースキンのガラスが脱落せず、中空層が維持されると噴出した火炎は中空層内を上方に伸びるが、アウトースキン

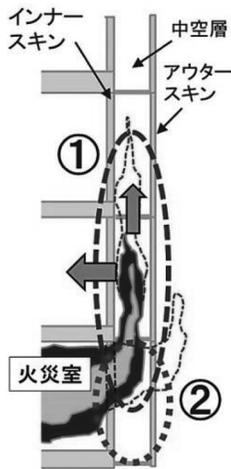


図6 ガラスの脱落と上階への延焼促進との関係

ンのガラスが脱落すれば、火炎はアウトースキンの外側に噴出するなどして中空層内を上方には伸びにくく考えられる。

したがってガラスの脱落に関して想定される条件は次の①②のようになる。

- ① 延焼を促進する条件：アウトースキンのガラスが火炎噴出後、長時間脱落しない。
- ② 延焼を促進しない条件：アウトースキンのガラスが短時間で脱落するか、インナースキンのガラスが長時間脱落しない。

しかしダブルスキンに標準的に使われているガラスが、火災の加熱に伴って、どの時点でどのような順に脱落するといった定量的な知見はない。そこで、ダブルスキンの実大規模の試験体を建築研究所の耐火炉に設置(図7、図8)して火災室の火熱によりガラスが脱落して火炎が噴出する時間を計測した。

火災室温度を標準火災加熱曲線に基づいて上昇させた結果、火災室の開口部にあたるインナースキンのLow-E複層ガラスは60分間脱落せず、その間は火災室から中空層に火炎が噴出することはなかった(図9)。

このことからダブルスキンに標準的に使われているLow-E複層ガラスは、ある程度の耐火性を有していることがわかった。この理由としては、Low-E複層ガラスの金属膜が日射と同様に火災からの赤外線を反射することによって、ガラス面の急激な温度上昇を抑え、ガラス面に発生するひずみを抑制したためと考えられる。

一般的にガラスが大きくなると、加熱によるひずみも大きくなり、脱落しやすくなることが考えられる。そこで、ガラスの大きさが脱落時間に及ぼす影響について実験した(図10)。前述の実験のインナースキン



図7 建築研究所耐火炉に設置したダブルスキン実験装置

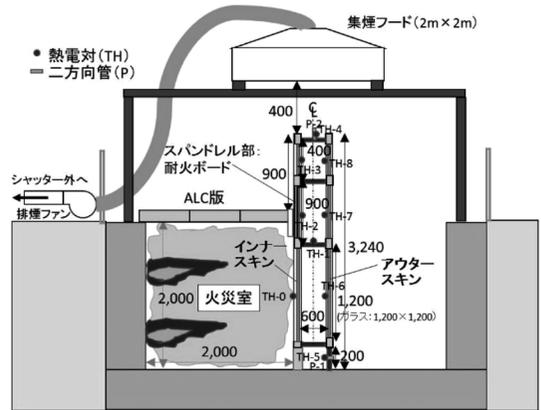


図8 ダブルスキン実験装置の断面図



2分30秒後：インナースキンのガラスに亀裂
32分後：アウトースキンのガラスに亀裂
63分後：インナースキンのLow-E複層ガラスが脱落

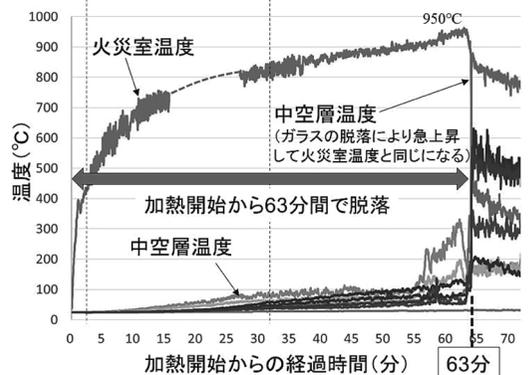


図9 実験結果(火災室の温度上昇とガラスの脱落時間)

に用いたLow-E複層ガラスとアウトースキンに使用した単板ガラスのそれぞれについて、大小二つの試験



図 10 ガラスの大きさが脱落時間に及ぼす影響の実験

体を同じ大きさの火源で加熱して、双方のガラスの大きさの違いによる脱落時間を比較した。

その結果、インナースキンの Low-E 複層ガラスはガラスが大きくなると脱落時間が短くなる傾向がある一方、アウトースキンの単板ガラスは亀裂が入ってもその厚さ（試験体は 15 mm）によっては脱落しない可能性があることがわかった。以上のように、ダブルスキンに標準的に用いられるガラスの種類や大きさが耐火性に及ぼす影響の度合いを整理した。

火災室に取り付けられているインナースキンのガラスが火熱によって脱落した後、アウトースキンのガラスが脱落しない場合は、中空層の中を火災室から噴出した火炎が上方に伸びることが想定される。特に中空層の厚さによって煙突効果が促進され、噴出した火炎が上方に伸びるようになる厚さが存在すると考えられる。

そこで、ダブルスキン部分を縮率 1/10 で再現した模型実験によって火災室から火炎が噴出した状況を再現して、開口条件や発熱速度をパラメータに中空層の厚さと中空層内に噴出した火炎の伸びとの関係を、中空層内の上下方向の温度分布などを計測して把握した（図 11）。

その結果、中空層の厚さが実大スケールで 1 m 未満になると、火災室から噴出した火炎が上階へ伸びる可能性が高くなることがわかった（図 12）。

さらに、中空層内を火炎が伸びたときに壁面が火炎から受ける加熱の状況を予測するために、実大スケールでの火災を再現した数値計算を行った（図 13）。結果として、中空層の厚さが実大スケールで 1 m 未満になるとダブルスキンの無い状態と比べて、この火炎からの加熱により中空層及び壁面の高温域が上方に拡大し、上階への延焼が促進される可能性があることがわかった。

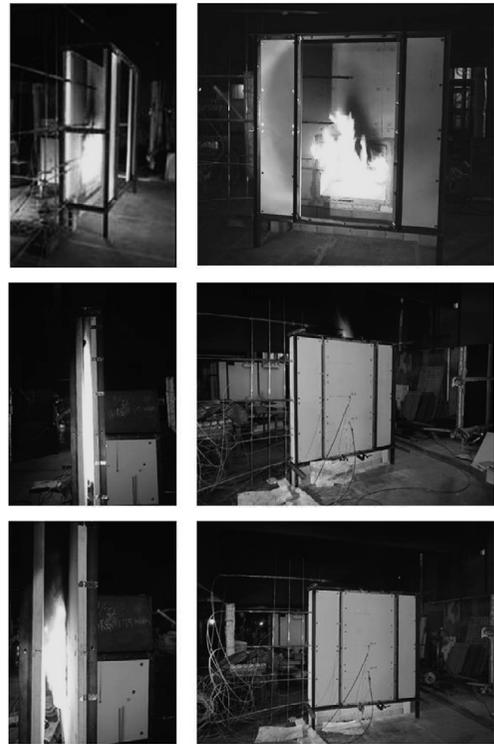


図 11 中空層の厚さによる火炎高さの変化
（上段：アウトースキンなし、中段：実大スケールで 0.4 m 相当、下段：実大スケールで 1.8 m 相当）

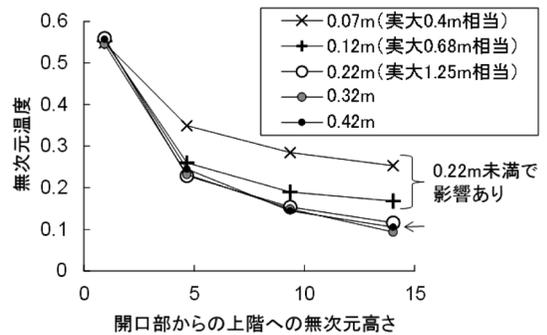


図 12 中空層の厚さと上方への温度上昇との関係

以上の実験的検討から、①アウトースキンのガラスが短時間で脱落する、②インナースキンのガラスが長時間脱落しない、③中空層が金属板などで防火上有効に仕切られている、のいずれかの条件を満たせば、ダブルスキンが上階への延焼を促進することはなく、一般的なビルと同等の火災安全性と評価できると結論づけた。

また、ダブルスキンの施工事例を踏まえて上階延焼を促進する可能性のあるガラスと中空層の仕様の組み合わせを整理した。

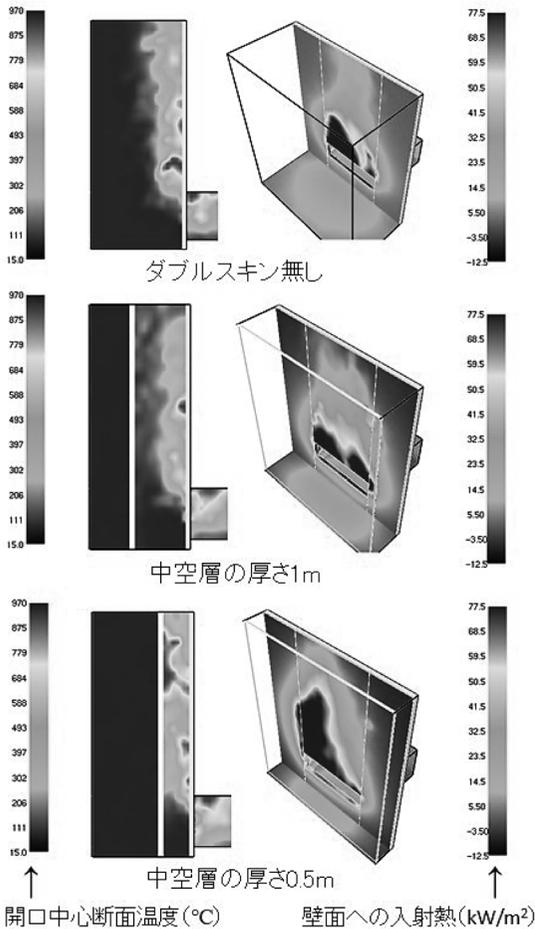


図 13 数値計算による実大スケールでの加熱性状予測

4. 木質内装の火災安全性の評価

4.1 木質内装のニーズとその火災安全上の課題

建築基準法では、火災安全上、壁や天井の内装仕上げに使うことができる防火材料として、不燃・準不燃・難燃材料を定めている。これは、出火の防止や、出火後の内装の燃焼に伴う熱や煙によって、建物の中にいる人が居室や階、建物からの避難に支障が出ないようにするためである。

その一方、視覚的にも暖かみを感じる木材を目に見えないかたちで室内の壁や天井などの仕上げ材料に使いたい、という需要がある。それは室内全面に限らず、天井や壁の1~2面もしくはその一部を木材で仕上げる、というものである(図14)。

しかし現在の防火基準では、内装の貼り方に関わらず木材のような防火性能の低い材料の使用が制限されている。

これは、燃えやすい内装材料の表面を炎が急速に燃

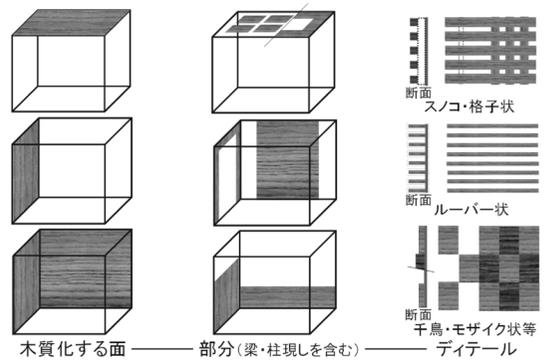


図 14 内装木質化のニーズの例

え広がることで発生する強い放射熱や煙に含まれる有毒ガス、避難経路の見通しを悪化させる大量の煙によって避難に支障をきたさないようにするほか、火災時に家具などの可燃物とともに内装が燃焼することによって、天井付近に高温の煙が溜まり、その熱によって生成した可燃性のガスが引火して室内で爆発的に延焼するフラッシュオーバー(以下、FO)の発生を早めないようにするためである。

このため木質内装の火災安全性としては、火災時に急速に燃え広がり、結果としてFOの発生を早めないようにすることが求められる。

FOのメカニズムでは高温の煙の溜まる早さが居室の規模や内装の貼り方によって異なり、FOが発生する時間も変わると考えられることから、同じ仕様の内装の仕上げで、規模が異なる居室の木質内装の燃え広がり方の比較実験を建築研究所で行った。

この実験では大小二つの規模の居室に置いたバーナーによって同じ強さの炎で火災を起こした場合、6畳間程度の面積の小さな居室(約9m²)では、木材で仕上げた壁が天井付近の煙層を通じて室全体に急速に燃え広がり、極めて短時間でFOした(図15)。

その一方、教室程度の大きな居室(約50m²)で天井を不燃化した場合(図16)には、壁全面に木材を使用しているものの、火源のバーナーの付近はいったん燃えるものの、天井付近に溜まる煙の温度が、規模の小さな居室のように急激に上昇しないため、壁の炎が火源の周辺で燃え止まり、FOしない、またはFOが遅延され、結果的には居室の内装全体に防火材料を使用した場合と同等な性能を有している可能性があることがわかってきた。

4.2 木質内装の貼り方によるFOの遅延効果

本研究では、内装木質化が可能な室の床面積を明らかにするために、内装の火災安全性をこのFOの遅延

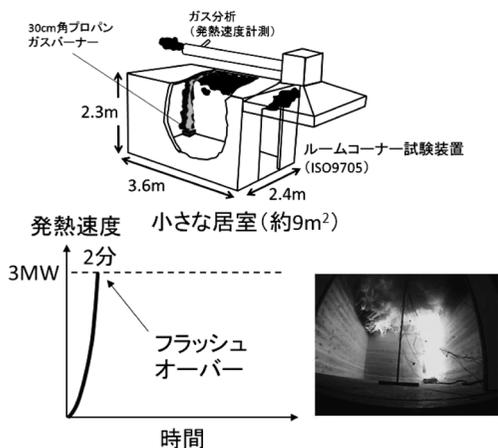


図 15 規模の小さな居室における木質内装の燃え広がり

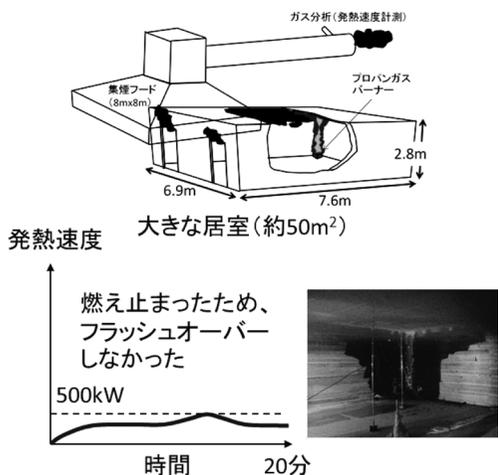


図 16 規模の大きな居室における木質内装の燃え広がり

効果に限定して検討した。天井を不燃化することによる FO 遅延効果が損なわれない室の面積を把握するために、建築研究所の実大火災実験棟において開口条件などをパラメータに、既往の教室規模の実験よりも規模の小さな床面積 30~40 m² の居室の試験体 (図 17, 図 18) による実大火災実験を、一定の火源を使って十数回にわたって実施した。以下に主な結果を紹介する。

実験の結果、天井を不燃化した室の FO 遅延効果は図 19 のように、火源付近の壁の仕上げ材がいったん燃焼して発熱するが、加熱を継続していてもそのまま燃え広がらず、天井付近に溜まる煙層の温度上昇に伴って木質壁が予熱されて引火するまでの過程によることが確認された。

さらに開口条件をパラメータとした一連の実験結果から、煙層の温度は、天井から下がる垂れ壁の下がり大きいと煙が天井付近に溜まるため上昇しやすいが、

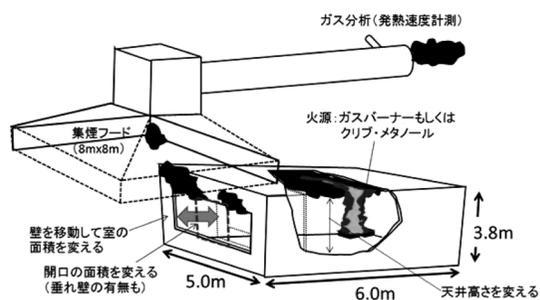


図 17 区画の開口や床面積などを変化させた実大火災実験



図 18 実大火災実験の様子 (左:着火後, 右:FO 発生時点)

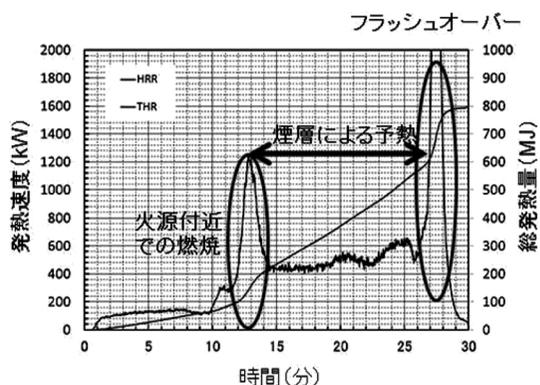


図 19 区画火災実験における発熱の履歴の例

開口が大きくなると垂れ壁の有無による煙層温度上昇に対する影響は小さくなるのがわかった。

開口条件と FO 時間との関係は、垂れ壁が大きく、開口が小さいと室内の内装材を予熱する煙層が形成されやすくなり FO の発生が早くなった (図 20)。これは言い換えれば室の換気量に対して可燃ガス発生速度が大きくなったことになる。

また、同じ開口条件で床面積が異なる場合の FO 時間を実測した結果、床面積が 40 m² で約 26 分、35 m² および 30 m² の場合はそれより 3~4 分 FO 時間が短くなった (図 21)。

さらに、不燃化した天井に木質梁を現しに (露出) した条件 (図 22) で実験した結果、FO 時間が不燃化した天井の FO 時間と比較して約 8 分短くなった。これ

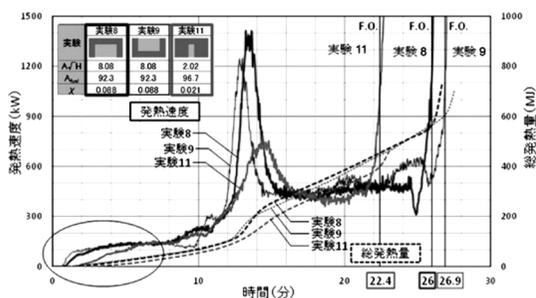


図 20 室の開口条件による FO 時間の相違 (床面積 30 m²)

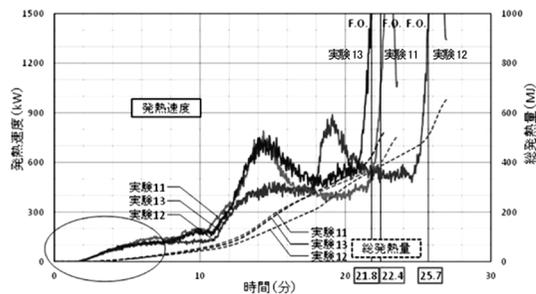


図 21 室の床面積による FO 時間の相違
(実験 11:30 m², 実験 12:40 m², 実験 13:35 m²)



図 22 木質梁現しの実験
(左: 天井不燃・壁木質仕上げ, 右: 天井に木質梁を追加)

は煙層に覆われる木質梁の表面積が、天井の表面積と同程度になったことから天井不燃化による FO 遅延効果が損なわれたためと考えられる。

一連の実験結果から、天井の不燃化による FO の遅延効果が期待できる室の最小面積は 30 m² 前後と見込まれ、さらに開口条件として垂れ壁が無い場合や開口が大きい場合は、室内を予熱する煙層が形成されにくくなり、さらに FO を遅延する傾向があることがわかった。

居室内の内装の燃焼拡大が進む要因として、①居室内に形成される煙層による内装材の予熱、②火災初期に内装材が燃焼する火源周辺や、煙層が形成される居



図 23 木質壁の仕上げによる燃焼性状の実験

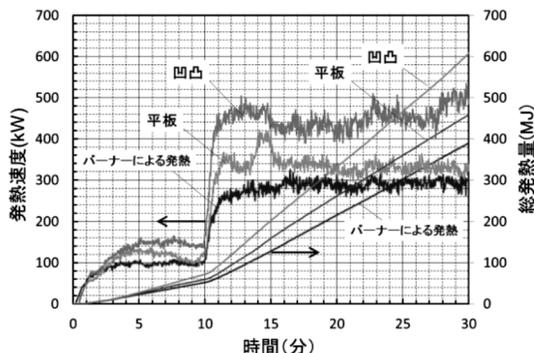


図 24 木質壁の仕上げによる燃焼発熱の相違

室の天井付近における木質内装材の表面積が影響していることなどを明らかにした。

仕上げの材料は同じ木材であっても、木材仕上げの壁に角材で凹凸を付けて表面積を 2 倍にして加熱実験を行ったところ (図 23)、燃焼に伴う発熱は 3 倍程度まで増加した (図 24)。木質内装材の貼り方によっては、内装が燃えるとこの程度の発熱が増加することを火災安全設計上想定しておく必要がある。

5. おわりに

本研究の成果が、今後のグリーンビルディングの設計にあたって火災安全性能評価や防火対策を検討するための技術資料や、内装などに関する建築基準法の更なる性能規定化に向けて、その技術資料として活用されることを目指している。

参考文献

- [1] U. S. Environmental Protection Agency, "Green Building," <http://archive.epa.gov/greenbuilding/web/html/about.html> (2017 年 1 月 22 日閲覧)
- [2] B. Meacham, B. Poole, J. Echeverria and R. Cheng, *Fire Safety Challenges of Green Buildings*, Springer, 2012