

## フラッシュオーバーに関する研究 (第5報)

## Study on the flashover (Series5)

真下 薫 雄\*

武田 松 男\*

大神田 郁 夫\*

## 概 要

第4報までの研究報告においては、扉または掃き出し窓に相当する開口部を設けた燃焼室で燃焼実験を実施し、フラッシュオーバーの性状を把握してきたが、本年度は、主に、開口部を普通の窓の形状にした燃焼室で燃焼実験を実施した。

その結果、開口部が扉の場合と全く異なった燃焼性状を示した。炎または煙は開口部から繰り返し噴出し、また、火災噴出前にゴースティング火炎の発生が確認された。

We had conducted fire experiments in a model combustion chamber with an open door, as we reported in the last report on flash-over. This time we carried out experiments in a chamber with an open window.

The results was quite different from those obtained from the experiment with an open door. Namely, flame or smoke blew from the opening several times and ghosting-flame appeared at the back of the chamber before the blowout of flame.

## 1 はしがき

フラッシュオーバーの性状を把握するために、前報(「フラッシュオーバーに関する研究(その4)」消防科学研究所報28号,平成3年)までの研究は、全て普通合板を使用し、開口部の下端が床面と一致する扉ないし掃き出し窓を想定した開口部をもつ模型燃焼室で実験を行ってきた。

過去において実施された火災実験による経験的知見から、フラッシュオーバーは、区画火災が燃料支配型<sup>(1)</sup>から換気支配型<sup>(2)</sup>に至る過程で発生する過渡的現象であると考えられており、開口部の形状(空気の供給条件)、室内の可燃物の種類・量等によって異なると言われている。

今回、開口部の下端が床面より高い位置にある普通の窓を想定した場合、また難燃合板の内装を施した場合の燃焼実験を実施したので、その結果を報告する。

## 2 実験方法

表1 実験条件

実験番号	燃焼室数	内装材	収物数	開口部形状	開口幅	
1	1	普通合板 5.5mm	3	窓	1/2	
2					2/3	
3	2	普通合板 5.5mm	点火室 3 + 前室 4	扉	1/2	
4					1/3	
5				窓	2/3	
6				扉	1/3	
7	1	難燃合板 5.5mm	3	窓	2/3	
8						普通合板 5.5mm
9						難燃合板 5.5mm
10						普通合板 9mm

○ 収物物は30×35×450mmの杉材6本と20×20×200mmの杉材14本を井桁状に組んだもの(約750g)を使用した。

\*第一研究室

(1) 実験装置

燃焼室（一室の内法寸法：幅850mm×高さ750mm×奥行1130mm）は、前報と同じものを使用し、内装は天井・壁・床の6面に施した。

開口部は基本形状を、扉の場合幅280×高さ560mm、窓の場合幅280×高さ280mm(窓下端の床面からの高さ280mm)とし、開口部に設けた両開き戸で開口幅を変えた。

2室規模の場合、単室の場合と同じ燃焼室をもう1つ連結し、連結部の開口は、幅560mm×高さ560mmとした。

(2) 実験条件

各実験の実施条件は、表1に示した。

(3) 点火方法

点火方法は、前報と同じ方法で行った。

(4) 計測

測定項目、方法及び計器の仕様は、表2に示した。

温度、ガス濃度および放射受熱量のデータ集録は、データ集録装置（YHP製3497A）を用い、集録速度20点/秒で集録間隔3～5秒で読み取り、これをパソコン（YHP製332CMA）で記録し、処理を行った。また、圧力は、動歪測定器（共和電業製DPM-613A）を介してペンレコーダ（理化電機製R-56型）で記録した。

3 実験結果

(1) 普通合板

ア 2室・開口部が扉の場合（実験3・4）

イ 前後室の境付近から、前室中央部まで燃焼してきた時点で、炎が確認でき、その後10秒～30秒で開口部から流出する煙が炎の噴出に変わった。(図2)

イ 火炎噴出時の開口部側の部屋中央天井高の $\frac{3}{4}$ の位置の温度は、465～510°C、開口部上端温度は425～450°Cであった。

表2 測定項目、方法および計器の仕様

測定項目	測定方法	測定点数	測定範囲
室内温度	熱電対シース型 (K線, シース径1.6mm) 熱電対 (K線, 線径0.65mm)	単室: 55点または50点 2室: 40点+30点 (前室)(点火室) (図1参照)	
床面温度	熱電対シート状 (K線, 厚さ0.125mm)	各室 1点	
ガス濃度	ガス分析計 (O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> ) O <sub>2</sub> : ガルバニ電池式 CO, CO <sub>2</sub> : 非分散型赤外線式	各 3点	O <sub>2</sub> : 0~25% CO, CO <sub>2</sub> : 0~40%
放射受熱量	薄幕サーモパイル	各室 1点	最大入力 2 W/cm <sup>2</sup>
噴出圧力・速度	ピトー管 (外径8mm) 圧力変換器	1点 (開口部)	0~10 g/cm <sup>2</sup>

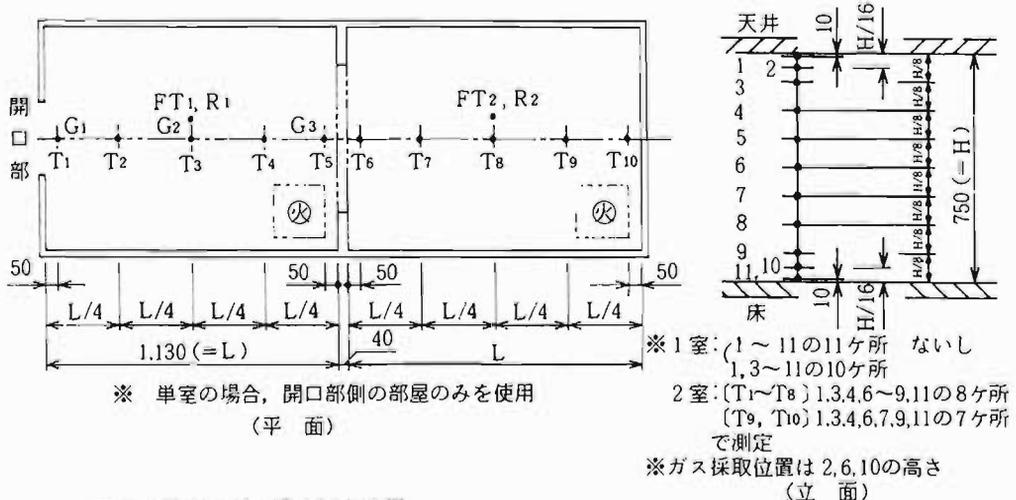


図1 温度・ガス濃度測定位置

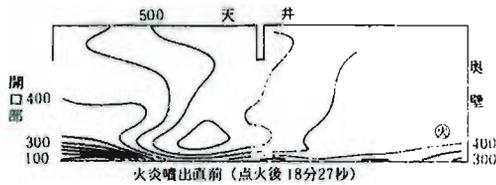


図2 燃烧室内温度分布〔等温線の間隔：50°C〕  
（実験4，開口部：扉，普通合板）

イ 単室・開口部が窓の場合（実験1・2・8・10）

（ア）実験1では，点火後17分45秒に，実験2，8では，それぞれ15分20秒，10分55秒に突然開口部から炎または煙が噴出し，以後ほぼ周期的\*に数回，火炎等の噴出が見られた。

（写真1）

\*火炎等噴出周期

実験1：35～70秒 平均46秒，噴出回数8回

実験2：23～60秒 平均42秒，噴出回数5回

実験8：9～26秒 平均16秒，噴出回数6回

（イ）実験10では，床を貫通し，使用していなかったガス採取用パイプ（G3-6）が塞がれていなかったため，そこから外気が流入し，パイプ先端部分に常にローソクの炎位の火が灯る状態となった。それが種火となって，周期的（周期7～10秒）に燃烧室内を火炎が広がる（噴出にまでは至らない）現象が見られた。

（ウ）火炎等噴出20～40秒前から，火災室内の温度，床面の放射受熱量及びCO・CO<sub>2</sub>濃度は急速に低下，O<sub>2</sub>濃度は上昇した。火炎等の噴出と同時に室内温度，床面放射受熱量，CO・CO<sub>2</sub>濃度はそれぞれ急激に上昇し，O<sub>2</sub>濃度は減少に転じた。（図3，4）

特に，床直上のO<sub>2</sub>濃度が，室内温度降下開始前，火炎噴出直前，火炎噴出後で限界酸素濃度（14～15%）をはさんで増減を繰り返しているのが特徴的であった。

なお，実験8では，火炎噴出前の温度・ガス濃度等の変化が明瞭にあらわれなかった。その原因は今のところ不明である。（図5）

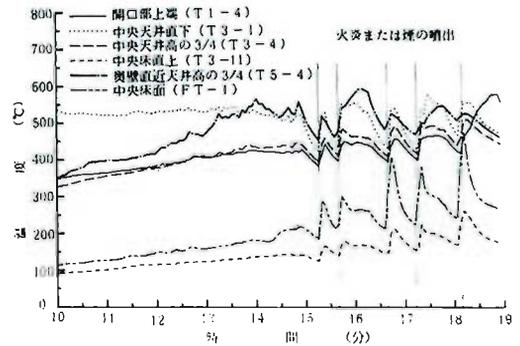


図3 温度変化

（実験2：単室，普通合板，開口部：窓）

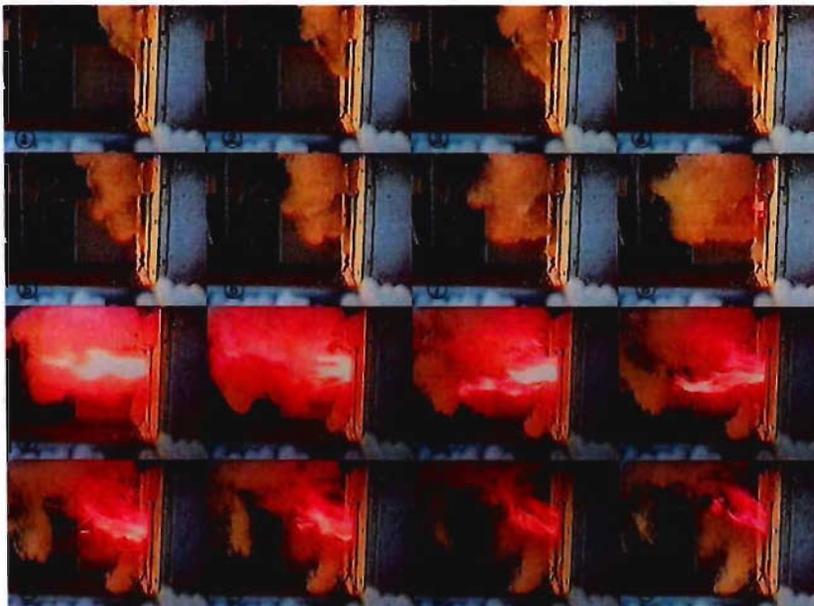


写真1 火炎噴出の状況（開口部：窓）（①から⑯まで約0.5秒）

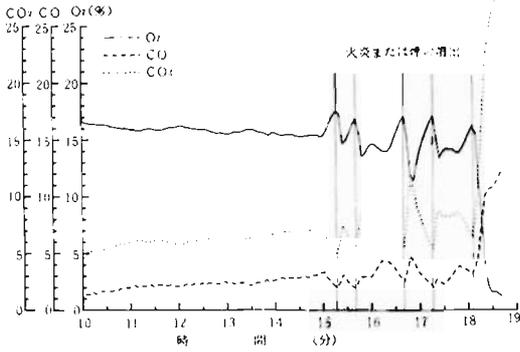


図4 ガス濃度変化(燃烧室中央床上5 cm)  
(実験2, 単室, 普通合板, 開口部: 窓)

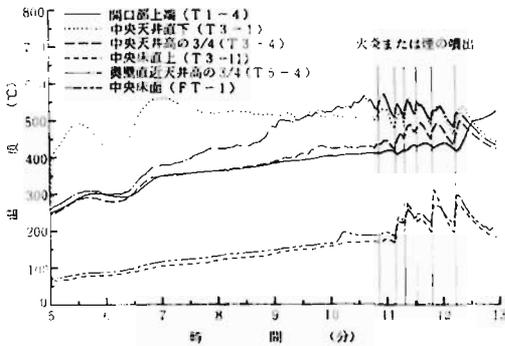


図5 温度変化  
(実験8, 単室, 普通合板, 開口部: 窓)

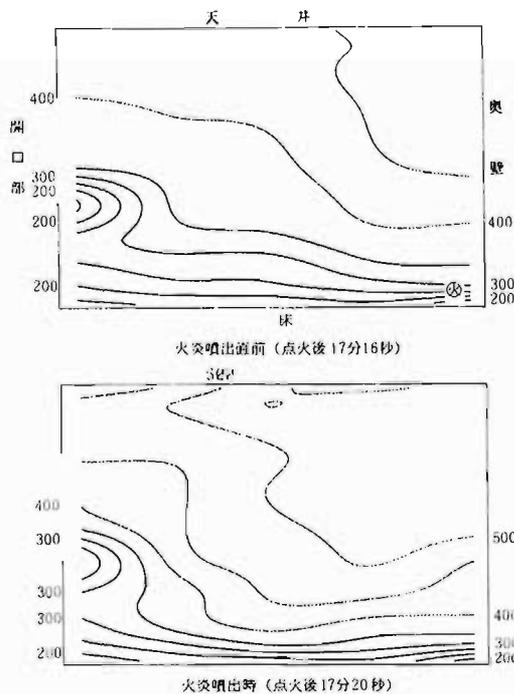


図6 燃烧室内温度分布  
(実験2, 普通合板, 開口部: 窓)

(エ) 最初の火炎等が噴出する前に、燃烧室内奥(開口部から奥行きの $3/4$ 位の所)に火炎が床や壁面から離れて燃烧室内を浮遊する現象(ゴースティング火炎)が見られた。

(オ) 火炎等が噴出する直前(室内温度下降期)は、吸気が強く、息つきも止み、開口部からの煙の噴出は、比較的静かな状態となった。

(カ) 火炎等噴出直前の室内温度は、最高でも $500^{\circ}\text{C}$ に満たなく、床付近で $200^{\circ}\text{C}$ 以下、開口部上端で $350^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ であった。(図6)

(キ) 火炎等の噴出時の開口部における圧力上昇は、 $0.08\sim 0.55\text{ g/cm}^2$ (全圧)、噴出速度は、 $4.8\sim 12.2\text{ m/sec}$ であった。

ウ 2室・開口部が窓の場合(実験5)

(フ) 点火後30分20秒に、火炎が噴出する現象が確認できた。しかし、1回だけで繰り返し発生することはなかった。

(イ) 火炎噴出直前の室内温度、床面の放射受熱量、ガス濃度の変化は、単室の場合と同じ傾向を示した。(図7, 8)

なお、27分頃にも温度・ガス濃度が火炎噴出前と同じ変化を示したが、炎が開口部付近まで走っただけで噴出には至らなかった。

## (2) 難燃合板

ア 2室・開口部が扉の場合(実験6)

(フ) 開口部から炎が噴出する以前に、既に、床は開口部まで燃焼していた。(図9)

(イ) 煙から炎への噴出の変化は、断続的で、普通合板の場合程勢いがなかった。

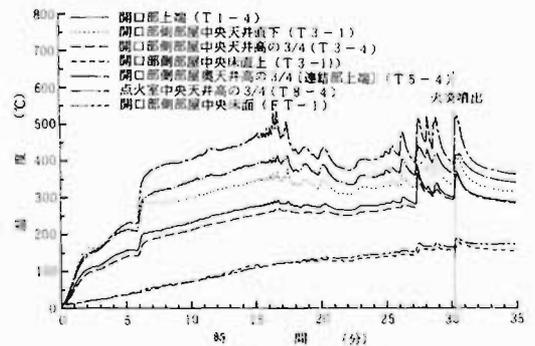


図7 温度変化  
(実験5, 2室, 普通合板, 開口部: 窓)

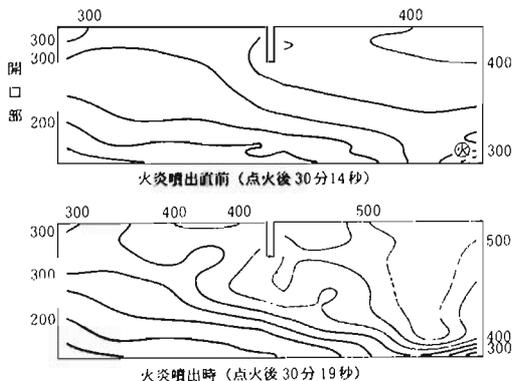


図8 燃烧室内温度分布  
(実験5, 2室, 普通合板, 開口部:窓)

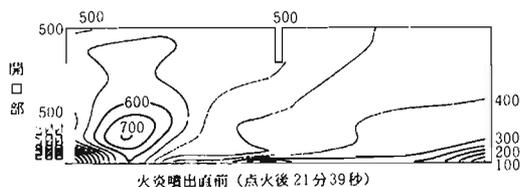


図9 燃烧室内温度分布  
(実験6, 2室, 難燃合板, 開口部:扉)

イ 単室・開口部が窓の場合(実験7・9)  
 (ア) 実験7では, 点火後12分19秒, 実験9では8分55秒と10分27秒に火炎の噴出が見られた。しかし, 普通合板のように何回も繰り返されることなく, 1回ないし2回で終わった。  
 (イ) 火炎噴出直前には, 普通合板の場合と同様の室内温度, ガス濃度の変化が見られ, ゴースティング火炎の発生も認められた。

(図10, 11)

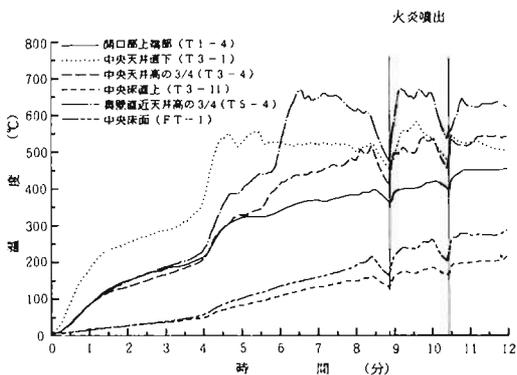


図10 温度変化  
(実験9, 単室, 難燃合板, 開口部:窓)

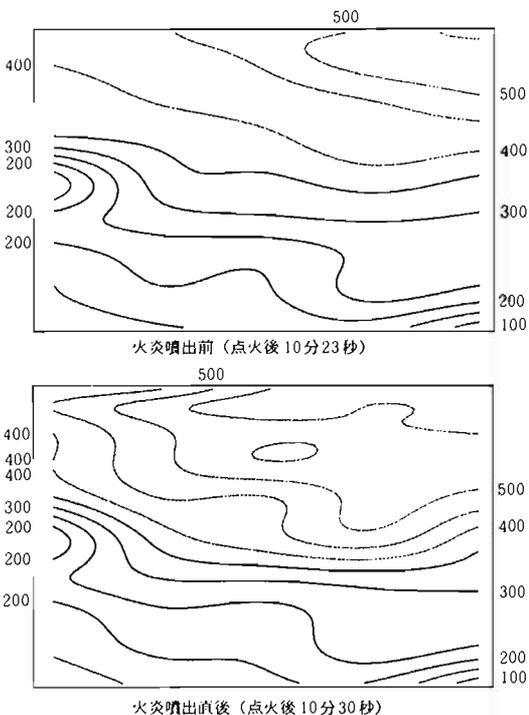


図11 燃烧室内温度分布  
(実験9, 単室, 難燃合板, 開口部:窓)

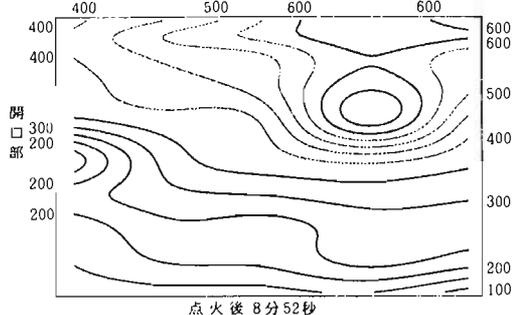


図12 ゴースティング火炎発生時の燃烧室内温度分布(実験7)

## 4 考察

(1) 開口部が窓の場合の火炎噴出の発生機構  
 火炎噴出前後の燃烧室内, 床直上の酸素濃度は温度降下開始前, 限界酸素濃度(14~15%)以下の11~15%であったものが, 室内温度降下(吸気の増加)と共に増加し16~19%に達したところで火炎を噴出し, その後, 再び限界酸素濃度以下まで減少するという過程を繰り返している。(図4)このような状況から以下のように考えられる。

燃烧が継続し, 室温が上昇すると, 天井や壁体加熱され, 可燃性の分解ガスの放出が盛ん

になる。室温上昇に伴う中性帯の降下と窓の換気効率が良くないことが相まって、分解ガス発生量の増加に見合うだけの酸素の供給が不能となり、燃焼（有炎）が止まる。その後も室内外温度差に起因する対流により外気の流入（酸素の供給）は続く。また、外気の流入による室温の低下により中性帯は上昇し、外気の流入はますます盛んになる。一方、有炎燃焼終了前に燃焼室内（特に、燃焼部付近）の天井や壁体は十分に加熱されているため分解ガスを放出し続ける。そのため、内部には、多量の可燃性混合ガスが充満することになる。そこで、おき火の状態になっていた元の燃焼面にも十分に酸素が充分供給されると再び炎が発生、混合ガスに引火し、急速に燃え広がりその膨張圧により炎や煙を噴出する。その際、室内の酸素を消費しつくすため再び酸欠状態（限界酸素濃度以下となる）となり、室内の有炎燃焼が終了する。以後、前記に示したような過程を繰り返すものと考えられる。

実験10では、ガス採取管の先端部で絶えず燃えていた炎（これは、酸欠状態で高濃度の可燃性ガスが充満しているところに、パイプを通して外気（酸素）が絶えず供給され、パイプ先端付近に部分的に燃焼範囲に入る混合ガスが形成され燃焼し続けた。）が火種となり、燃焼範囲に入る混合ガスが形成される都度、火種の火が引火して燃焼してしまうため、内部に大量の混合ガスが蓄積することがなく、大きな火炎の噴出に至らなかったと考えられる。

## (2) 開口部が窓の場合の火炎噴出と過去の模型実験結果との比較

前報までの実験結果では、フラッシュオーバーに関する研究(その3) (消防科学研究所報26号)、平成元年)に示されている開口部閉鎖型の場合の火炎噴出の現象が発生要因的(熱・可燃性ガスが蓄積し、酸欠状態にあるところに新鮮な外気が流入する)には類似している。

開口部閉鎖型の場合、開口部は扉で最盛期以後に火災室の扉を人為的に閉鎖・開放することにより、火炎を噴出させた。そのため、火炎噴出前の室内温度は約500~650°Cと高かった。

今回の場合、火災の成長段階で自然発生的に起こった現象であり、火炎噴出前の室温も

150~500°Cと低く、周期的に繰り返し発生している点が大きく異なっている。(図6, 13)

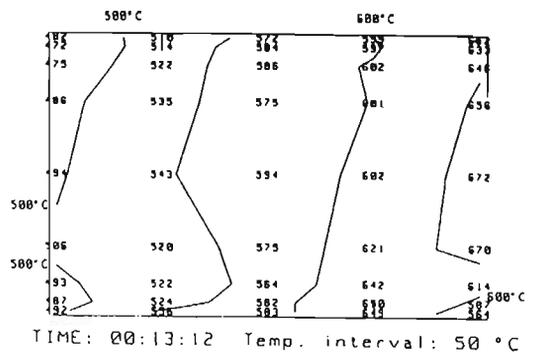


図13 火炎噴出直前の燃焼室内温度分布 (開口部閉鎖型)

## (3) 開口部が窓の場合の火炎噴出の危険性と発生予測について

開口部が窓の場合、開口部から突然、火炎が噴出する時期の燃焼室内温度は、最高でも天井付近で400°C~500°C、床上では140°C~270°Cと低く(2室規模の場合、開口部側の室内温度は、更に低い。)開口部から噴出している煙の温度も比較的低い。また、火炎噴出前は、息つきも止み、開口部から流出する煙の状況が比較的静かなため、開放された窓の付近で進入準備等の作業をしているような場合に、突然噴出する火炎にさらされる危険が大きい。更に、模型では、火炎噴出後酸欠となり有炎現象は一時的に消えるが、実際の建物では、噴出時の熱・圧力で窓ガラスが割れ、換気状態が良くなるため、室内が一気に火炎につつまれる恐れがあると考えられる。

噴出時期の予測は、連続的に温度やガス濃度を測定し、作図化することにより、その変化からほぼ確実に可能であるが、実験8のように明瞭な温度降下を示さない場合もあり、また、一時的な温度測定、煙の掃き出し・吸気の状態から判断することは難しい。そのため、消防隊が、現場到着時に、火炎噴出の可能性を判断することは、現在までの研究結果からは、難しいと思われる。

しかし、前述のように、火炎噴出前に室内において、ゴースティング火炎が発生する現象が見られることもあるので、その場合、火炎の噴出が真近であると判断できる。

#### (4) 開口部が扉の場合の発生予測について

模型実験では、火炎噴出前、前後室の境付近まで延焼してきた時点で、燃焼室内に火炎が視認でき、内部が燃焼していることが確認できた。しかし、この時、濃煙を通して炎までの見通し距離はわずか1 m余りである。この見通し距離は、実火災では、開口部直近まで延焼してこなければ炎が確認できない距離であり、この時点は、模型実験結果では、既に火炎が噴出した後であることから、実火災の場合には、炎が確認できるとほぼ同時に炎が噴出するということになる。そのため、室内の火炎の視認状況から発生時期を予測することは難しいと思われる。

予測の方法としては、現在のところ前報で述べた様に、開口部上端部の温度から判断するのが一番良い方法であると考えられる。

### 5 まとめ

#### (1) 開口部が扉の場合（2室）

ア 扉の場合、火炎が噴き出すというより、開口部から流れ出ている煙が、突然、炎に変わるという状況を呈する。

イ 発生時期は、普通合板の場合、部屋の中央部まで延焼が進んだ時期、難燃合板の場合、開口部直近まで延焼してきた時期であった。

ウ 発生予測は、現在のところ開口部上端の流出する煙の温度から判断するのが適当と考えられる。

#### (2) 開口部が窓の場合

ア 開口部が窓の場合、扉の場合とは全く異なる火炎を噴出し、普通合板の場合には、周期的に数回発生した。

イ その発生機構は、換気不良に伴う酸欠から有炎燃焼が終了し、その後室内に大量の可燃性分解ガスが蓄積、そこへ新鮮な外気(酸素)が流入することにより、燃焼範囲に入る混合ガスが形成され、再び立ち上がった炎の火が引火し、急激に燃焼し噴出すると考えられる。

ウ 火炎噴出前には室温の降下、CO・CO<sub>2</sub>濃度の低下、O<sub>2</sub>濃度の増加等の変化が認められ、最初の火炎噴出前には、ゴースティング火炎の発生が確認されることもあった。

エ 前ウに示す状況から、継続的な温度・ガス濃度の計測により火炎噴出時期の予測は可能

であるが、一時的な計測から判断することは今のところかなり難しい。

オ 難燃合板の場合、火炎の噴出が1～2回であったこと以外、普通合板と同じ結果であった。

### 6 あとがき

開口部の形状が窓の場合の火炎の噴出は、火炎噴出後も室全体が火炎に包まれないことから、本来、フラッシュオーバーと呼ぶことは適当でない。例えば、ISO防火試験用語（ISO3261）の定義<sup>\*3</sup>・JISの建築防火用語の定義（案）<sup>\*4</sup>いずれの場合にもフラッシュオーバーには該当しない。

しかし、消防の見知からすると、一般に、消防隊は煙の噴出している開口部の窓ガラスを破壊したり、扉を開放した場合等に、噴出している煙が突然火炎に変わる現象をフラッシュオーバーと呼んでいることが多い。この現象は、熱と大量の可燃性ガスが蓄積している酸欠状態にある室内に、新鮮な外気が流入する（酸素が供給される）ことにより発生するものと考えられ、発生機構的（熱・可燃性ガスが蓄積し酸欠状態にあるところに外気が進入する）には開口部が窓の場合の火炎噴出と同等と考えられること。また、消防隊に対する危険性を考慮した場合、その危険性が非常に大きいことから、今回の現象は、フラッシュオーバーの一形態として捕らえることが適当と考えられ、今後もフラッシュオーバー研究の一部として簡便な予知の方法の確立のための研究を行う予定である。

#### \* 1 燃料支配型の火災

火災初期または開口部が十分に大きい場合の室内火災のように、換気のいかに係わらず、燃焼部位に空気の供給が十分にあり、燃焼物の燃焼速度が燃焼特性によって左右される火災

#### \* 2 換気支配型の火災

室内火災最盛期のように燃焼速度が室内の換気（流入空気量）に左右される火災。

#### \* 3 ISO防火試験用語（ISO3261）による定義

「The transition to a state of total surface involvement in a fire of combus-

tible materials within a compartment」

- \* 4 J I Sの建築防火用語（案）による定義  
「火災時燃焼に伴い室内の上部に蓄積した可燃性ガスが、燃焼範囲にはいった時急激に火炎が拡大し、室全体が火炎に包まれる現象」

#### 参考文献

- (1) 消防科学研究所報 26号（平成元年）

- (2) 消防科学研究所報 28号（平成3年）

- (3) 日本火災学会編「火災便覧 新版」共立出版  
（昭和59年3月）

- (4) 安全工学協会編「安全工学講座1 火災」海  
文堂（昭和58年）

- (5) 長谷見「区画火災の数学モデルとフラッシュ  
オーバーの物理的機構」建築研究所報告 No.111  
1986年12月