

フラッシュオーバーに関する研究(その4)

— 模型燃焼室による燃焼実験 —

Study on the flashover in a model compartment

—An experiment on combustion by using a model compartment—

桜井 高 清**

武 田 松 男*

大神田 郁 夫*

概 要

フラッシュオーバーの中でも、特に、煙火災(Smoky Fire)と呼ばれる状況から急速に火炎が噴出する状況に至る現象の再現と、火炎噴出時期の判断要素を得ることを主眼に模型実験を実施した。その結果、火災時における屋内進入する際には、開口部上部の温度によって、ある程度フラッシュオーバー発生の時期を予測できることが確認できた。

The purpose of this model fire was to study the phenomena of flashover, focusing on the rapid development of fire from a smoky fire, and on the factors to determine the time of its sudden change to flames.

As a result of the study, we found the way to recognize to some extent the danger of flashover by the temperature at an overhead opening of the fire room.

1. はしがき

フラッシュオーバーに関しては、ISO防火試験用語(ISO3261)の定義(フラッシュオーバーとは、ある区画内で可燃性の材料が火炎の中にその全表面が巻き込まれる状態への遷移)に基づく現象を把握するために、模型実験を実施してきたところであるが、この定義では、既に開口部から火炎が噴出している状況であっても、火災室下方の床などの可燃物が未だ燃焼していない場合には、フラッシュオーバーが発生していないことになり、消防隊の立場からは妥当なものと言えない。

火災現場で活動する消防隊員にとって、最も危険な事象は、火災室が、未だ最盛期に至っていない煙が充満・噴出している状態において突然火災が発生し、急速に室内が炎におおわれる現象である。このような現象をフラッシュオーバーとしてとらえ、その再現と発生時期予測の判断材料を得ることを目的に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

(1) 実験装置

燃焼室(内法寸法、間口850mm×奥行1130mm×高さ750mm)の構造を図1に示した。

前面部には、幅280mm×高さ565mm(扉1枚分)の開口部の外側に、両引き戸を取り付け開口幅を変えられるようにした。

内装材は、天井、壁、床の6面に取り付けた。

2室の場合には、単室と同規模の燃焼室をもう1つ連結し、連結部の開口は、幅510mm×高さ565mmとした。

(2) 点火方法

火源は、杉辺材(20×20×200mm)を5本ごとに井桁状に5段積み(計25本、約750g)としたものを使用した。

火源は、側壁及び奥壁面から5cm離して置き、点火約30秒前にメタノール約50mlを火源下のオイルパン(縦200×横200×高さ10mm)に注ぎ込んだ後、電気火花により点火した。

*第一研究室 **第四研究室

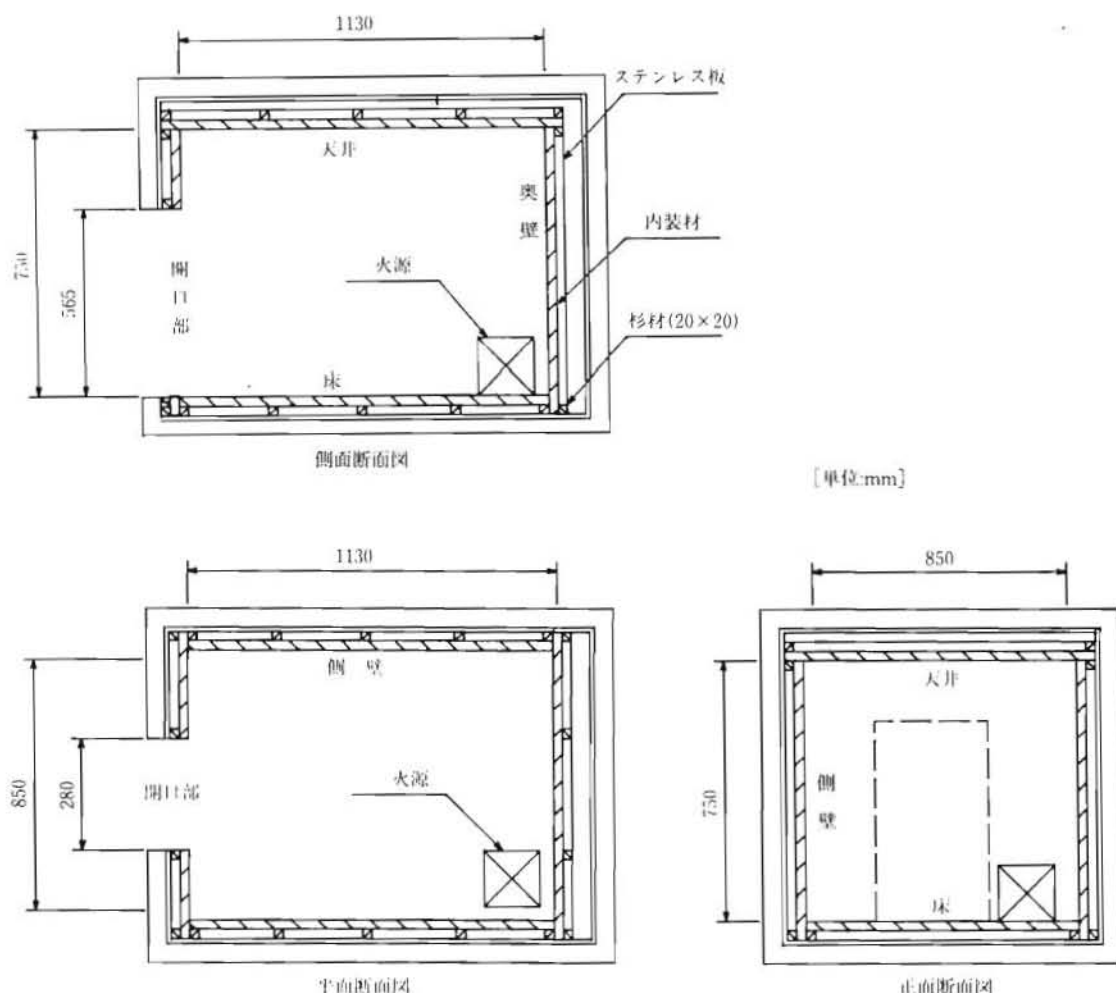
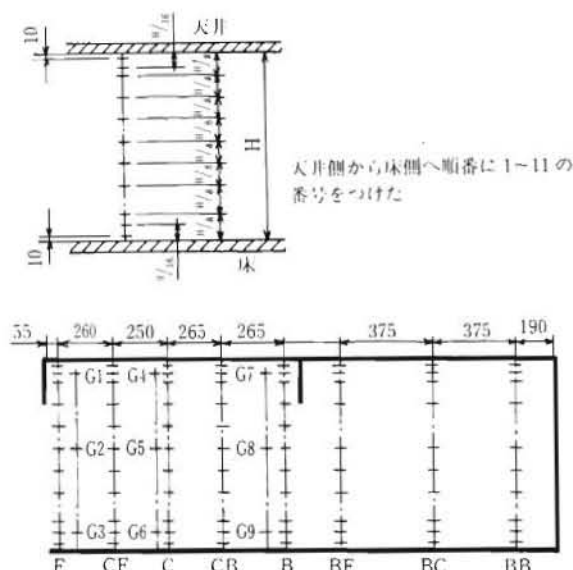


図1 模型燃焼室の構造



(3) 測定項目

ア 温度

燃焼室内各部の温度変化および温度分布の変遷を把握するため、燃焼室内に熱電対を設置して測定した。(図2)

イ ガス濃度

燃焼室内の燃焼状況およびガス濃度変化を把握するため、燃焼室内からガスを採取し、酸素 (O_2)、一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO_2) の濃度を測定した。(図2)

ウ 放射熱量

燃焼室内上部の熱気流層から床面が受ける放射熱量を把握するため、中央床面に薄膜サーモパイルを設置し、床面における放射受熱量を測定した。

なお、各測定項目の測定方法及び計器の仕様を表1に示した。

表1 測定方法及び計器の仕様

測定項目	測定方法	測定範囲
温度	K熱電対 $\Phi 0.65\text{mm}$ K熱電対シース型 $\Phi 1.6\text{mm}$	
ガス濃度	マルチガス測定器 (O_2 、 CO 、 CO_2)	O_2 : $0 \sim 25\%$ CO 、 CO_2 : $0 \sim 40\%$
	ガルバニ電池式 O_2 濃度計	$0 \sim 25\%$
	CO 赤外線ガス分析計	$0 \sim 20\%$
	CO_2 赤外線ガス分析計	$0 \sim 20\%$
床面放射熱流量	薄層サーモパイル	最大入力 $2\text{W}/\text{cm}^2$

* 各データは、データローガーを用い収録速度20点/秒で、収録間隔4～5秒で読み取った。

(4) 実験条件

各実験の実施条件は表2に示した。

表2 実験条件

実験番号	燃焼室数	内装材	収容物数	開口条件	備考
1	1	普通合板 9mm		1/1	
2				2/3	
3				1/2	
4				2/3	
5		普通合板 5.5mm	5	1/3	
6				1/2	
7				1/3	
7-2	2		点火室5 + 前室6	2/3	
7-3				1/2	
8	1		5	2/5	床の放射熱流量測定

○ 収容物には、火源と同じクリブを使用した。
○ 開口条件は、開口の基本形状を285×565mm (厚1枚分) とし、幅を変えることにより、面積が基本形状の2/3、1/2、2/5、1/3 となるようにした。

3. 結果及び考察

(1) 目視観測

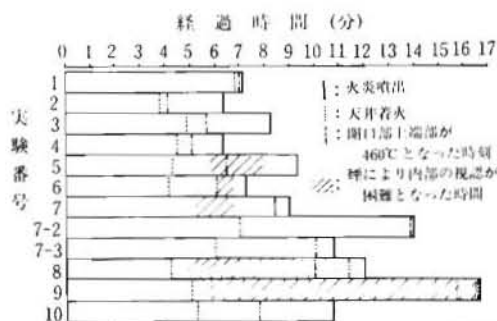
燃焼室内の目視状況を図3に示した。

全ての実験で、天井着火直後から発煙量は急増し、その後、噴出する煙が急激に火炎に遷移する現象(フラッシュオーバー(F.O.))が確認された(実験1の場合、床面が燃焼し

ていないので、厳密な意味では、未だF.O.発生に至っていない)。しかし、煙で見えなくなった火炎が、再び確認できるようになった後、急速に拡大し、開口部から噴出したのは、2室規模で実施した実験9のみであり、炎の再確認から噴出まで僅か8秒であった。

単室・収容物無の場合(実験1～4)は、常に、中性帯の下側に火炎が確認できる状態にあった。その他の場合には、煙により一時的に炎が見えなくなる現象が見られたが、炎の再確認から噴出まで30秒～2分の時間があつた。

これは、室内の可燃物が多く、奥行きのある部屋で開口部が小さいもの程、煙により内部の燃焼状況が確認困難となる状況を示しており、特に、燃焼室の形状の影響が大きいことがわかる。



※ 7-2、7-3、10については、煙による内部の視認状況は観測していない。

図3 燃焼室内観測結果

(2) 温度

ア フラッシュオーバー発生時の温度特性

別表に各実験のF.O.発生時及びF.O.発生前の一時的火炎噴出時の温度測定結果を示した。

F.O.発生時、火災室内温度は、中央部の天井高Hの3/4の高さの位置では467～609℃、床上1/4Hの高さでも463～746℃に達している。(実験1では床上1/4Hで178℃となっているが、これは火炎噴出時に床面がまだ燃焼していなかったことによる。)

また、過去の燃焼実験結果からF.O.発生時には開口部上端室内側の温度が約500℃となることが知られているが、今回の実験

結果では463～564℃であった。

F.O.発生前においては、発生する煙のほとんどが火炎の中を通過しないため、煙中の分解生成物（可燃性のガスや液体微粒子等）は、燃焼せずそのままの形で室外に放出されやすい。そこで、空気と混合して可燃性混合気が形成され、しかも十分温度が高いと発火すると考えると、開口部上端の噴出煙の最低温度約460℃は、木材の発火温度400～450℃と関連づけられる。

ここで、開口部上端の温度が約460℃になってから火炎噴出までの時間についてみると最大3分（実験10）のものもあるが、実験9のように460℃になると同時に火炎噴出しているものもある。

噴出する煙が急速に火炎に変わる過程を、前述のように木材の発火温度と関連付けて考えると、木材の発火温度400～450℃であることから、煙が噴出している部屋に進入する際のF.O.の発生危険の有無を室外から判断する要素として、安全性を考慮して、発火温度の下限である400℃をとることが適当と考えられる。

一時的火炎噴出時の場合（実験2及び、4）には、開口部上端部の温度は469～480℃、燃焼室内中央部床上3/4Hの温度は467～475℃とF.O.発生時とほとんど変わらないのに対し、床上1/4Hの高さの温度はいまだ177～296℃となっており、連続した火炎へと至らないのは、床面付近の温度上昇が十分でなく、分解ガスの発生速度が遅く、外部に放出後、十分な可燃性混合気形成されていないためと考えられる。

イ 火災の進展に伴う温度変化

F.O.発生時までの燃焼室内の燃焼状況を把握するために図4に単室火災（実験5）における火災室の温度を、また、図5～7に二室火災（実験9）における出火室及び、開口部側の部屋（前室）並びに開口部付近の温度の推移を示した。

出火室中央部（図4、5）では、天井着火直後から、天井直下で、急激な温度上昇を示しており、高温のガス層が形成されていることがわかる。そのガス層は次第に厚

みを増し下降するため、その下側の温度も次第に上昇してくる。また、その高温ガス層からの放射熱により床面が加熱されるため、床直上の温度は緩慢な上昇を継続したのち、急激な温度上昇し、F.O.発生に至っている。（ここまでの状況は、単室・二室火災ともほぼ同じ過程を経ている。）

開口部側の部屋においては、中央部、開口部付近とも出火室の天井着火直後にやや急激な温度上昇を示した後、床面上から天井下までほぼ様な上昇率で温度上昇をし、火炎噴出期に相前後して急激な温度上昇を示している。

一般的に火災室の温度時間曲線はF.O.の発生時期に下に凸になるような急激な上昇を示し、最盛期に至ることが知られているが、図4、5に示されるように、温度時間曲線が下に凸になるような温度上昇は、温度測定部位（高さ）によって異なり、上記のようなF.O.発生時期の温度時間曲線の特徴からすれば、天井着火後、火災室上部は、既に火災最盛期とほぼ同じ状況にあることに注意を払う必要がある。

火災室から煙が流入している部屋内において消防活動する場合には、既に、天井部が燃焼しているにも係わらず、煙により確認できない場合もある（実験9の場合、温度測定の結果から、火災が確認された約40秒前には前室の天井着火していた）ことから、室内上部の熱気流層の蓄積状況によりF.O.発生の危険性を判断することも必要と考えられる。

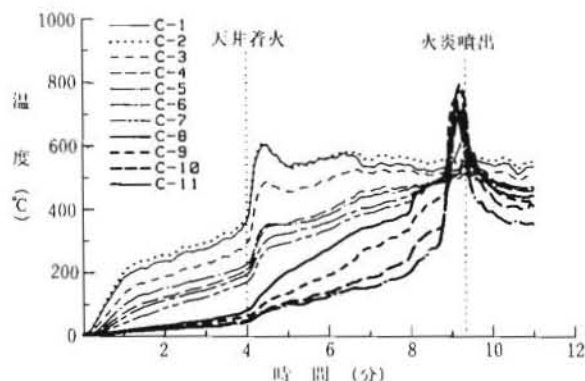


図4 火災室 中央部の温度変化（実験5）

ウ 床面上の火災の推移

図5～7から分かるように、中性帯下側
床付近（温度測定部位9、10、11）の急激

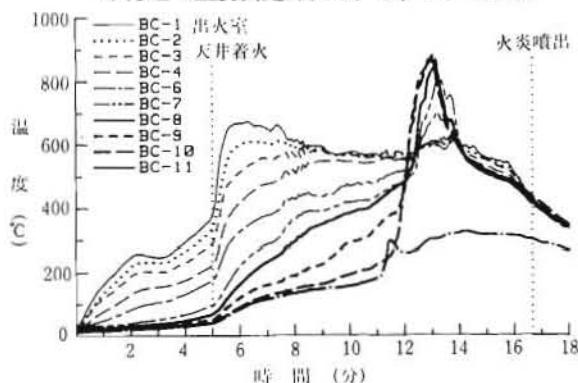


図5 出火室 中央部の温度変化（実験9）

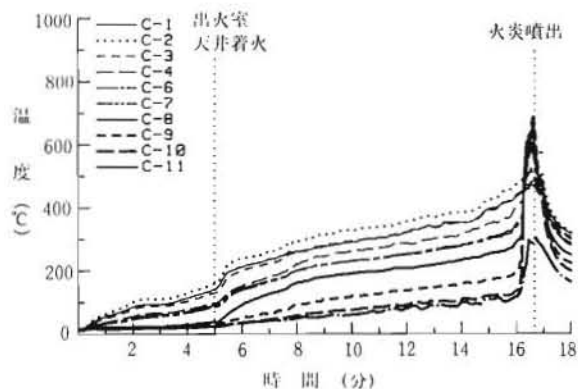


図6 出火室に隣接する部屋 中央部の温度変化（実験9）

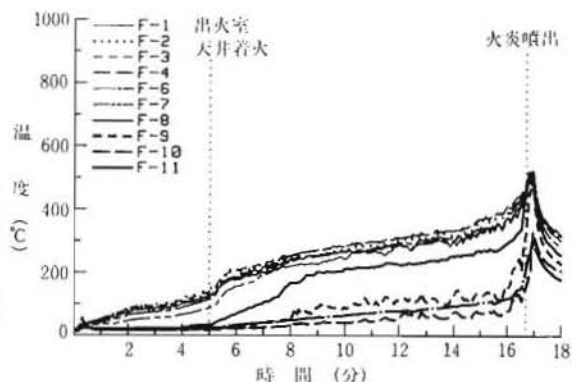


図7 出火室に隣接する部屋 開口部内側の温度変化（実験9）

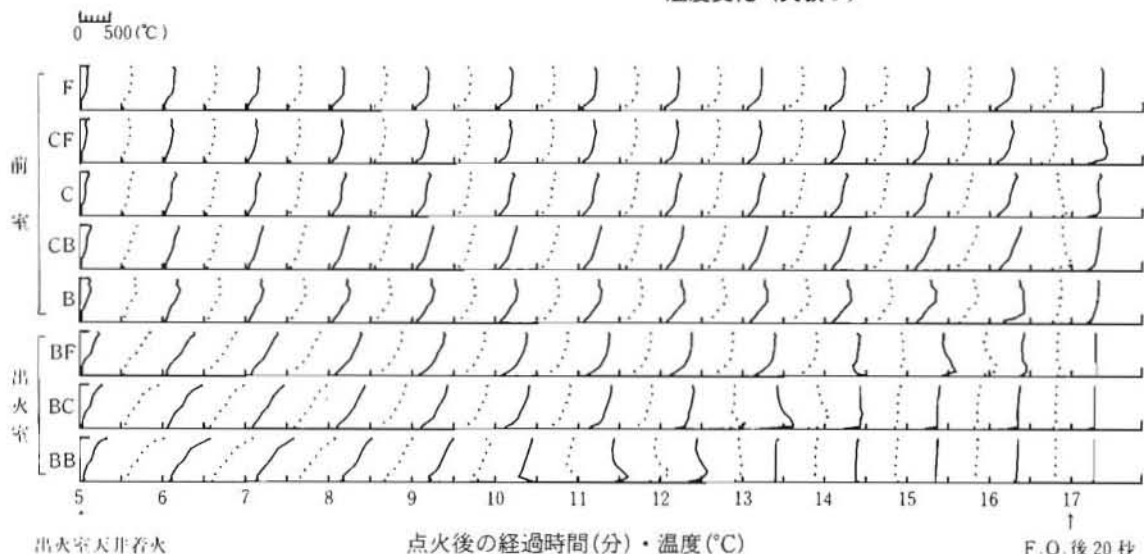


図8 燃焼室内各部の経過時間、床面からの高さ、温度の関係（実験9）

な温度上昇の時期は、測定位置によって異なっている。火点側から開口部側に進むに従って温度の上昇時期は遅れており、火炎が火点に近い奥壁の方から開口部側に進んでいくことが予測できる。

中性帯下側の火炎の進行状況を図8に示した。横軸が温度、縦軸が床面からの高さを示している。10分頃火点に近い出火室一番奥（BB）の床面に着火、床面と天井間で温度が逆転する現象が見られ、その現象が時間経過と共に、BC、BF、B、CB、C、CF、Fと開口部側に進行しF.O.に至っている様子がわかる。

図9に各実験の床上火面の進行速度と開口率の関係を示した。進行速度は、全体に

開口率が大きい程大きくなる傾向が見られる。ここで、特に注意をはらわなければならないのは、実験9の二室規模の実験に見られるように、出火室では、単室時よりもゆるやかであったものが、出火室から開口側の部屋に火炎が進入したとたん火炎の進行速度がそれまでの5～6倍にも速くなることがあることである。

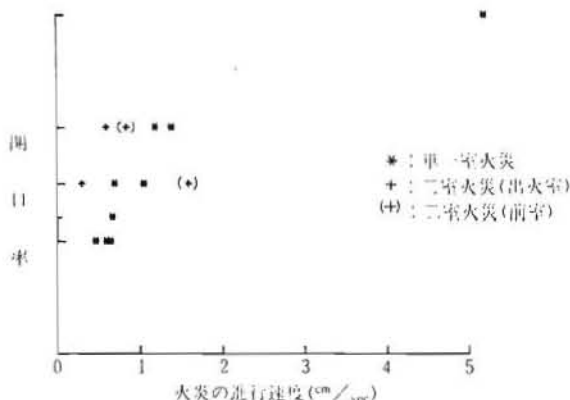


図9 床上部の火炎進行速度（天井高の $1/4$ ）

このことについては、前述の目視の結果と合わせると、火災室に接して、未だ燃焼していない部屋に進入した際、その部屋に延焼して来たことに気がついた時には、既に脱出が不可能となることがありうることをあることを示していると言える。

(3) ガス濃度

F.O.発生時の O_2 , CO , CO_2 濃度を別表に示した。また、実験9の前室中央部のガス濃度変化を図10に示した。

温度の場合と同様、中性帯の上側（G4, G5）においては、天井着火直後から、ガス濃度は急激に変化し始め、F.O.期には、 O_2 濃度はほぼ0%, CO は10～15%, CO_2 は18～23%にまで達する。中性帯下側（G6）は、天井着火後徐々に変化し始めるものの、F.O.直前まで O_2 濃度はほぼ19～20%, CO ・ CO_2 は共に約1%の状態が続き、火炎噴出期（F.O.期）に急激な変化を示し、上部濃度とほぼ同じ濃度にまで達している。

このように、ガス濃度（ O_2 , CO , CO_2 ）の場合、天井着火後から、F.O.までの間、若干の増減はあるものの、ほぼ一定の値となってしまうため、ガス濃度からF.O.発生時期を判断

することは難しいと考えられる。

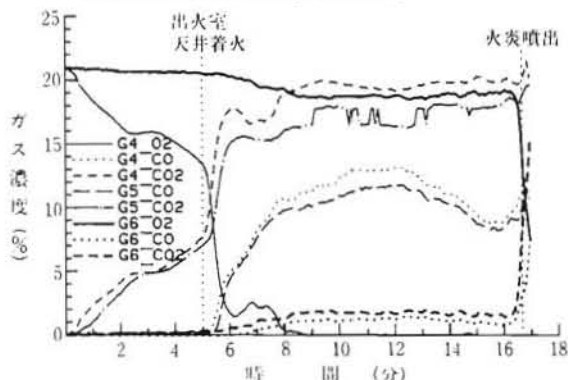


図10 ガス濃度の変化（実験9、前室中央部）

(4) 床面受熱量

フラッシュオーバーは、「天井に溜まった高温ガス層からの熱放射により、床面などの室内の未燃焼部分の温度が上昇し、それらの表面温度が発火温度に近くなると、火炎が高速で広がって、室内の可燃物に一齐に火がつく」との推定もあることから、実験10では、中央床面における放射受熱量を測定し、その結果を図11に示した。F.O.直前にゼロになっているのはセンサーが焼け切れたためである。

床面の放射受熱量は、天井着火直後に急激に増加し、300～350mW/cm²のレベルにまで達した後、F.O.期まではほぼ同じレベルを保っている。ここでも、天井着火直後が大きな転換期になっている。一般に、F.O.発生時の床面時の床面受熱量は2 W/cm²であると言われている。今回簡易なサーモセンサーで測定したため数値の精度は高くないが、全体的な傾向はほぼ把握できたと思われる。

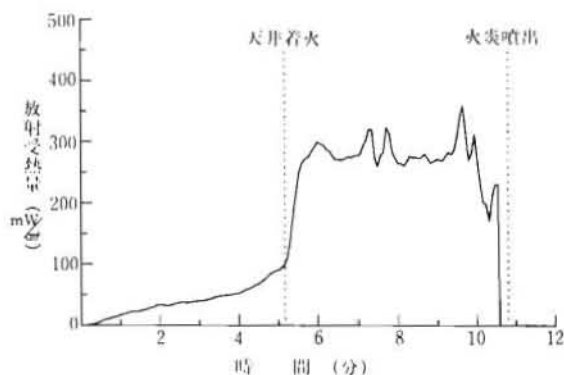


図11 床面中央部の放射受熱量の変化（実験10）

4. ま と め

- (1) 火災室から盛んに煙が流出している時期は、火災室内での燃焼はかなり進んでいる。(遅くとも、天井着火後の時期である。)
- (2) 天井着火後、火災室の煙層内は、既に温度、ガス濃度とともにF.O.直前の状況とほぼ同じレベルに達している。
また、今後の研究によるが、屋内で活動中には、天井下の熱気流の蓄積状況からF.O.発生危険の判断が可能になるものと考えられる。
- (3) 開口部上端(室内側)における温度が約400°Cを越えているような場合、F.O.が間近(長くとも2〜3分以内)であると考えられる。
- (4) 火災室に隣接し熱気流層ができていない部屋では、火災室から延焼してくると、急速に火災が広がる危険もある。

5. あとがき

以上、フラッシュオーバーに関する燃焼実験結果について、考察してきた。

フラッシュオーバーの発生時期については、温度分布より、火災室内の中央部に最高温域が発生した時点ということが、前報により示されていたが、現実問題として、火災現場では、消防隊が、火災室内の温度分布を把握することは困難であり、また、部屋中央の温度を測定すること自体、難しいという問題があった。

今回、手軽に計測可能な、開口部上端部の温度に注目し、その温度が木材の発火温度に到達後、ある時間の範囲内で発生することが判明したこと

が大きな成果であった。

なお、本実験結果の中では、フラッシュオーバー発生の時間については、あえて触れなかった。その理由としては、まず、フラッシュオーバーの発生時間は、延焼拡大を支配する種々の条件(出火位置、火源の大きさ、内装材の種類等)によって大きく影響され、それらの諸条件を考慮しての定量化することが困難であること。また、仮に、定量化・数式化が可能になった場合でも、実火災現場で、消防隊が到着時にそれらの条件や、出火からの経過時間を把握すること自体が困難であること等から、消防活動にとってフラッシュオーバーの発生時間はあまり意味を持たないからである。

今後は、今回、模型実験により得られた関係が、そのまま、より大きい区画内の火災や実大規模の火災に適用できるかどうか、また、部屋から部屋へ火災が拡大する際のフラッシュオーバーについて研究して行く予定である。

6. 参考文献

- (1) 消防科学研究所報 25号(平成元年)
- (2) 日本火災学会編「火災便覧、共立出版(昭和59年3月)」
- (3) 齊藤、吉田：「模型による室の燃焼挙動の定量化について」 火災34巻3号(1984)
- (4) 横井：「内装材が初期の火災性状に及ぼす影響」 火災学会論文集12巻1号(1962)
- (5) 相馬、平野：「災害に関する相似模型について」 日本機械学会誌第83巻735号(昭和55年)
- (6) 安全工学協会編「安全工学講座1 火災」 海文堂 (昭和58年)

別表

燃焼室内温度・ガス濃度測定結果

実験番号		1	2	3	4	5	6	7	7-2	7-3	8	9	10
内装材		普通合板 9mm					普通合板 5.5mm						
収容物		無				5段積みクリブ 5個					5+6個 (出火室)(前室)		5個
開口率		1/1	2/3	1/2	2/3	1/3	1/2	1/3			2/3	1/2	2/5
天井着火時分		6'50"	3'50"	4'55"	4'30"	4'20"	4'10"	4'00"	7'00"	6'00"	4'00"	5'00"	5'10"
連続的 火炎噴出時 (F.O.時)	時分	7'10"※2	6'24"	8'17"	6'22"	9'21"	7'17"	9'02"	13'53"	10'25"	12'05"	16'40"	10'48"
	温度(℃)												
	F-4※1	520	564	554	546	490	477	501	463	474	555	465	497
	C-4	539	609	545	594	511	504	491	479	498	567	467	493
	C-6	490	630	592	625	547	516	523	514	470	614	503	515
	C-8	178	746	648	725	650	629	571	549	463	629	663	500
	O ₂ 濃度(%)												
	G-4	3.0	0	0	※4	0	0	0			0	0	
	G-5	6.0	1.3	0.2		—※5	—	—			—	—	
	G-6	20.8	9.6	4.5		10.9	14.5	4.4			11.7	12.7	
	CO濃度(%)												
	G-4	4.2	11.9	13.5		12.6	12.3	14.5			11.7	11.0	
	G-5	8.6	11.5	14.6		10.3	10.2	12.1			10.0	10.0	
	G-6	0	1.5	7.6		1.7	2.9	6.6			10.7	3.4	
	CO ₂ 濃度(%)												
	G-4	16.2	17.6	18.9		21.3	21.0	22.8			20.8	20.8	
	G-5	16.1	20.0	22.9		18.0	17.8	19.1			18.7	19.0	
	G-6	0.1	13.6	26.0		10.5	7.3	16.9			10.7	9.6	
一時的 火炎噴出時	時分	※3	4'45"		5'06"								
	温度(℃)												
	F-4		480		469								
	C-4		467		475								
	C-6		371		455								
	C-8		177		262								

* 1 図2に示す測定位置

* 2 ISOのF.O.の定義に従えば、火炎は噴出したものの、この時点では、F.O.の発生にはまだ至っていない。

* 3 一時的火炎の噴出は発生していない。

* 4 ガスの採取・分析を実施していない。

* 5 計測器の不調により、データ収集ができなかった。