

倒壊した木造建物の延焼に関する基礎的研究

Foundmental study of spread of fire on the collapsed house

昆 文 雄*
 武 田 松 男**
 篠 原 雅 幸**

概 要

兵庫県南部地震の市街地火災で指摘された、木造家屋の倒壊が市街地火災の延焼速度に及ぼす影響を把握するため、縮尺1/30と縮尺1/20の模型家屋群を使用して燃焼実験を行った。その結果、縮尺1/20の模型家屋では建物の倒壊により延焼速度に40～55%の減少が見られた。しかし、縮尺1/30の模型家屋では倒壊による延焼速度の減少はほとんど見られず、模型実験結果を実大規模の火災へ適用するまでには至らなかった。

In the Hyogoken-Nanbu Earthquake, it is said that the spread of fire wasn't speedy because houses collapsed. So we made fire test by 1/20scale or 1/30scale model houses to study the spread of fire in the case of houses collapsed.

As a result, when houses collapsed, on the 1/20scale model houses the spread speed of fire decreased in 40～55% compared to they didn't. On the other on the 1/30scale ones, it didn't.

1 はじめに

兵庫県南部地震では、神戸市を中心に多数の市街地火災が発生した。神戸市内の木造密集地域の市街地火災における延焼速度は、当庁で使用している延焼速度式による延焼速度よりかなり小さく、その原因として、木造建物が倒壊したことが指摘された。

東京においても神戸市の延焼地域のような構成の市街地が広く見られることから、建物が倒壊した場合にも現行の延焼速度式を拡張・適用できるようにすることが求められた。

そのための基礎研究として、模型の木造家屋を使用して建物の倒壊が市街地火災の延焼速度に及ぼす影響を把握するための燃焼実験を行い、模型実験結果を実大規模に適用することの可能性を検討した。

家屋の詳細が不明なため、実験報告書の図及びビデオ記録から建物の寸法、開口部の位置・大きさ、建物間の距離等を求め、縮尺1/20及び1/30の模型を作成した。模型の外観は図2に示した。

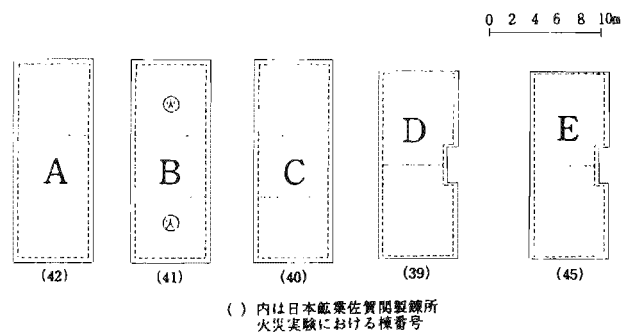


図1 実験家屋配置

2 実験方法

(1) 実験模型

実験には、実大実験で延焼拡大の様子が記録されている日本鉱業佐賀関製錬所(大分県)における火災実験の第1実験で使用した木造家屋の模型を使用した。

家屋の配置を図1に示した。A棟～C棟は3世帯用平屋家屋、D棟、E棟は2世帯用平屋家屋である。

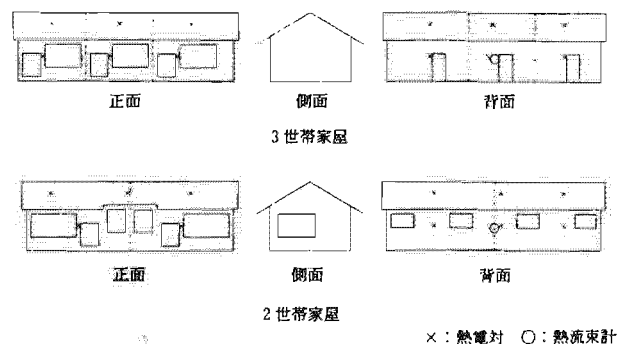


図2 実験家屋の外観及びセンサー取付位置

*水利課 **第一研究室

模型は、縮尺1/20、1/30ともに、壁・屋根及び各世帯間の界壁を5mm普通合板、床・天井を3mm普通合板で作成した。(使用した合板の含水率はいずれも3~8%であった)開口部は切り抜き、ガラス無しの開放とし、また、各世帯内の間仕切りは省略した。

(2) 実験条件

表1に各実験の条件を示した。

縮尺1/20の模型実験では、実験場所の関係でA~Dの4棟を使用した。模型家屋の重量は、点火用クリブと同じクリブを建物内各住戸内に入れ調整した。

なお、日本鋳業佐賀製錬所火災実験における火災荷重は建材を含めて130~150kg/m²(1棟当たり15000~17000kg)であったが、模型1棟当たりの重量

表1 実験条件

実験番号	縮尺	倒壊の有無	建物の間隔	建物重量 (g)				
				A棟	B棟	C棟	D棟	E棟
1	1/30		建物の縮尺に基づく	1800	1790	1850	1500	
2				2300			1800	
3	1/20	倒壊無し	建物の縮尺に基づく	4000			3000	-
4								
5								
6								
7	1/30	全倒壊	建物の縮尺に基づく	2000			1800	
8								
9								
10								
11								
12	1/20	全倒壊		4000			3000	-

は、燃焼時間を延ばすため縮尺に対応する重量(縮尺1/30の模型で560~630g、縮尺1/20の模型で1900~2100g)より重くした。

(3) 点火方法

B棟の両側の住戸内(図1参照)にクリブを置き、助燃剤としてエチルアルコール各25ccを使用して、電気スパークにより同時に点火した。

なお、クリブは、縮尺1/20の模型では10×10×100mmの杉材を5本毎に井桁状に5段積みにしたものを、縮尺1/30の模型では10×10×80mmの杉材を4本毎に井桁状に5段積みにしたものを使用した。また、助燃剤は、点火1分から30秒前にクリブ下に置いたオイルパン(直径80mm、深さ10mm)に注入した。

(4) 測定項目

計測の概要は図3に示した。

ア 建物の壁・屋根の温度

A、C、D、E棟のB棟に面する壁及び屋根にそれぞれ各2~3枚のシート状熱電対(K線)を張りつけて、壁・屋根の温度上昇を測定した。(図2参照)

イ 被延焼建物壁面の受熱量

C、D、E棟の後壁の中心に熱流束計をそれぞれ各1台設置し、壁面が火災からの受ける熱量(熱流束)を測定した。

ウ 燃焼速度(重量減少速度)

模型建物を置く台(1500×2400mm)の下に荷重変換器(容量50kg f)を3台設置し、燃焼による重量減少を測定した。

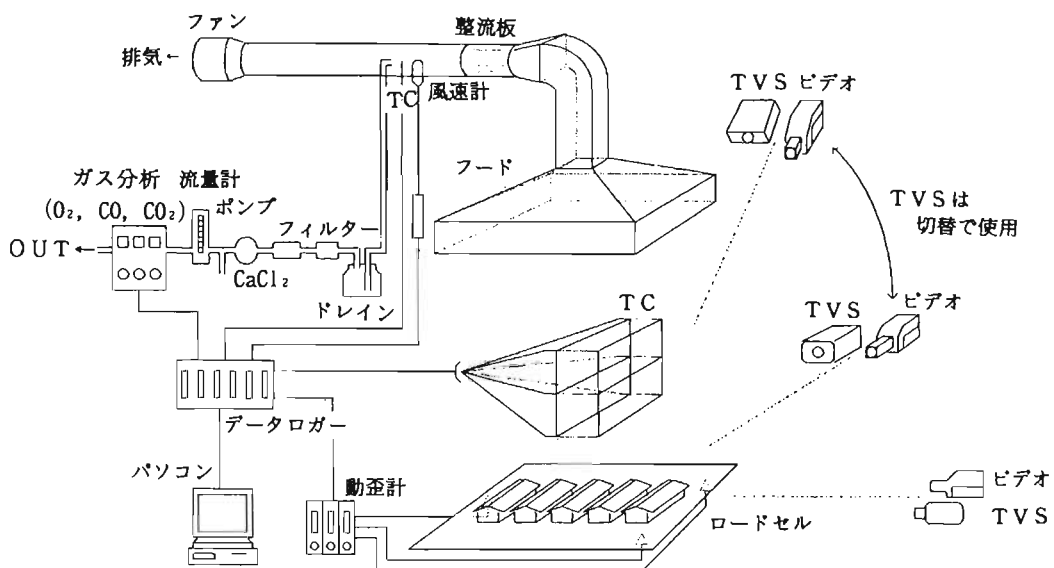


図3 実験概要図

エ 炎の放射エネルギー

B棟とE棟を結ぶ線上のB棟から3.5mの位置に赤外線映像装置(AVIO TVS-8200)を設置し、炎の熱画像を撮影した。

撮影は、画質改善機能を設定(AVE4ないしAVE8)して、実験開始から終了までの間10秒毎に行い、光磁気ディスクに記録した。

炎の放射エネルギーは、記録した熱画像を赤外線映像装置付属の温度計測ソフト(PicEd Avio)で処理して求めた。

オ 発熱速度

模型家屋の上方にフード(2200×2000mm)を取り付け、集めた燃焼ガスをダクトに導き、ダクト内の温度、風量、ガス(O₂、CO、CO₂)濃度を測定して、酸素消費法²⁾により求めた。

カ 燃焼範囲、炎の高さ

目視観察記録及び正面、側面上方に設置したビデオカメラの撮影記録から、時間経過に伴う延焼範囲、着火時間、炎の高さなどを求めた。

なお、温度、燃焼重量、受熱量及び発熱速度に係わる各データは、データロガー(TEAC DL9060)を介して5秒毎に計測した。

3 結果及び考察

(1) 被延焼建物の着火状況

各実験における建物の着火時間及び着火状況を表2に示した。

表2 着火時間・着火状況

実験番号	A棟	C棟	D棟	E棟
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	9' 15" 燃焼物の接触	—	/
4	11' 40" 接炎	6' 30" 接炎	15' 15" 放射	
5	19' 15" 放射	6' 50" 接炎	—	
6	17' 55" 放射	7' 18" 接炎	13' 00" 放射	
7	15' 15" 接炎	7' 36" 接炎	17' 54" 放射	—
8	13' 40" 接炎	6' 07" 接炎	18' 06" 放射	—
9	4' 00" 燃焼物の接触	6' 30" 燃焼物の接触	14' 00" 燃焼物の接触	21' 31" 燃焼物の接触
10	4' 40" 燃焼物の接触	4' 30" 燃焼物の接触	12' 25" 燃焼物の接触	21' 30" 燃焼物の接触
11	6' 23" 接炎	7' 03" 接炎	14' 43" 燃焼物の接触	23' 26" 接炎
12	8' 47" 燃焼物の接触	8' 50" 燃焼物の接触	19' 05" 燃焼物の接触	/

注：— は着火しなかったことを示す。

ア 棟間隔の縮尺が建物の縮尺と同じ場合

実験3において、焼けて崩れ落ちた壁が接触して火元建物(B棟)からC棟に着火延焼した以外、火元建物から隣接する建物へ延焼しなかった。

イ 棟間隔が建物の縮尺に基づく距離の2/3の場合

B棟からC棟への延焼は、全てB棟正面の開口部から噴出した炎の接炎によるものであった。

C棟からD棟への延焼は全て放射によるものであった。着火の時期は、実験6における噴出火炎からの放射による1件を除き、C棟が赤熱したおき火状態となった時期、ないし、燃焼の盛りが過ぎて炎が小さくなり、おき火が多くなった時期であった。実験5では、D棟の後壁の炭化が進み、部分的に赤熱灰化し、燃え抜けるまでに至ったが、着火延焼しなかった。

B棟からA棟への延焼は、縮尺1/30では全て接炎、縮尺1/20の場合、早期に着火した1件は接炎、他の2件は、B棟が燃え落ち残火に近い状態になったおき火からの放射によるものであった。

放射による着火と、接炎による着火とでは、着火前の部材に対する加熱状態が異なるために、着火後の延焼拡大にも相違が見られる。放射による着火の場合、着火部分だけでなく壁面全体が、着火前に十分に加熱されている状態にあるため、壁面の一部分に着火すると、炎が急速に壁面に沿って拡大し、広範囲の壁面が同時に燃え上がるようになった。

一方、接炎により着火した場合、着火前の加熱は接炎部分とその周辺の極限られた範囲であり、それ以外の部分は加熱が不十分な状況下にある。そのため、壁体や軒先の一部に着火した後も、炎が急速に壁面上を燃え広がることなく、徐々に壁面全体に燃え広がる様相を示した。

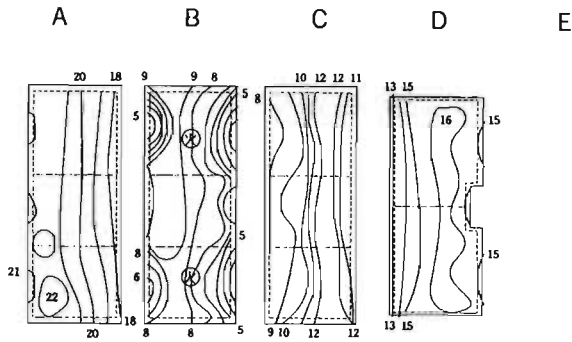
そのため、図4で示すように、着火から家屋全体に火が回る時間は、放射による着火の方が、接炎による着火の場合よりも速くなる傾向が見られた。

(2) 延焼動態

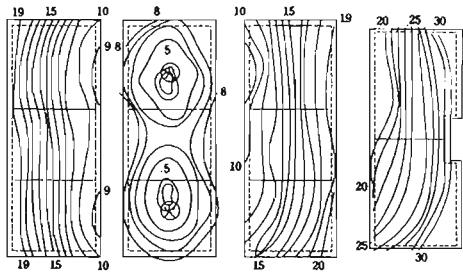
実験条件毎の時間経過に伴う火炎先端位置の変化(延焼動態)を図4に示した。

ア 家屋が倒壊しない場合

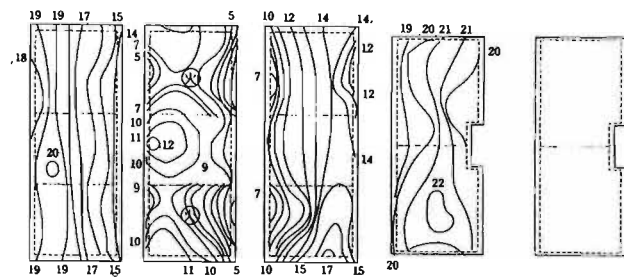
今回の一連の燃焼実験に使用した模型家屋は、各世帯間の界壁以外、建物内に間仕切りを設けなかった。そのため、接炎による着火、放射による着火に係わらず、壁体や軒先に着火した炎は、開口部から屋内に入ると、短時間のうちに室内を通り抜けて反対側の開口部から噴出した。



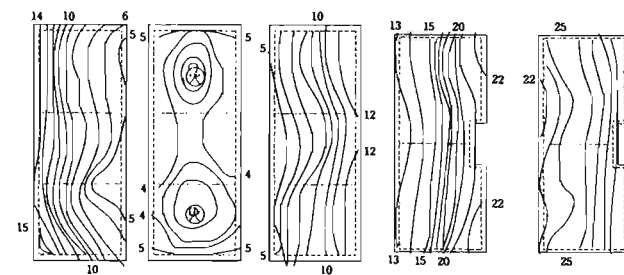
4-1 縮尺1/20 倒壊無 (実験6)



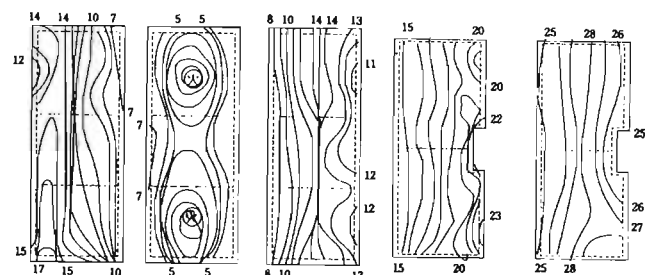
4-2 縮尺1/20 全倒壊 (実験12)



4-3 縮尺1/30 倒壊無 (実験8)



4-4 縮尺1/30 全倒壊 (実験10)



4-5 縮尺1/30 B、D棟倒壊 (実験11)

図4 延焼動態

各家屋の延焼に着目すると、建物は前後両側から中央部に向かって燃焼拡大する形態をとり、実大実験の結果(図5¹⁾参照)と大きな相違が見られた。

模型を使用して実大実験と延焼拡大を比較する場合には、住戸内の間仕切りの影響も考慮する必要があると考えられる。

イ 家屋が倒壊している場合

崩れ落ちた建物の壁体や屋根材が互いに接触し、あるいは、わずかに重なり合うような状態であった。そのため、マクロ的に見ると、火災は次々と途切れることなく燃え移り、火炎先端の位置はほぼ様な速さ進行した。局部的には、断片化された壁・屋根材の下側を潜るように炎が拡大して延焼し、壁・屋根材の部材は周りから炎に包まれて燃焼する様子が見られた。

0 2 4 6 8 10 m

※ 数字は点火からの経過時間(時:分)

×: 点火場所

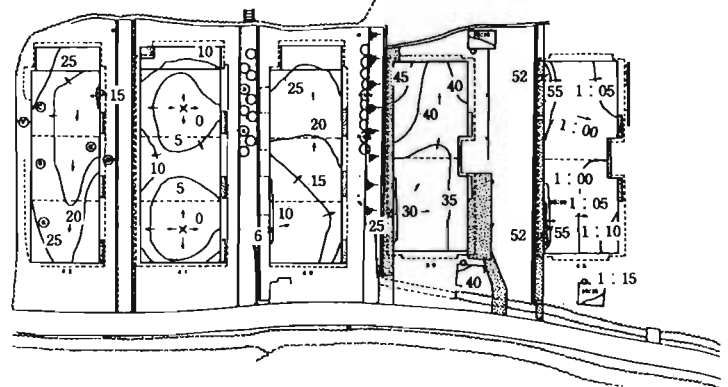


図5 火炎先端位置の変化

(佐賀関火災実験)

(3) 延焼拡大速度

各実験について、各棟に着火した時間と着火した面と反対側の開口部から火炎を噴出した時間をそれぞれプロットしたものを図6に示した。

ア 家屋が倒壊しない場合

縮尺1/30模型の場合、C棟の着火からE棟ないしD棟の前面に火炎先端位置が達するまでの平均燃え広がり速度は3.9~4.1cm/min(実大規模相当で約70m/h)、縮尺1/20模型の場合、C棟の着火からD棟正面開口部から火炎を噴出するまでの平均燃え広がり速度は7.6~10.3cm/min(実大規模相当で78~88m/h)であった。

佐賀関精錬所火災実験の場合、図5から求めたC棟(40号棟)着火からD棟(39号棟)正面開口部から炎を噴出するまでの平均燃え広がり速度は、約45m/hである。

今回の一連の実験では、模型の大きさが制約され

たこともあり、小規模な2通りの縮尺の模型実験しか実施できなかった。そのため、家屋が倒壊しない場合について、実大実験と模型実験とを比較し、縮尺と延焼速度との間に相関を見出すことはできなかった。

イ 家屋が倒壊している場合

縮尺1/20模型の場合、倒壊した家屋の平均燃え広がり速度は4.5cm/min(実大規模相当で約50m/h)であり、倒壊により燃え広がり速度に約40~55%減少が見られた。

縮尺1/30模型の場合、平均燃え広がり速度は4.0~4.1cm/min(実大規模相当で約70m/h)であり、建物が倒壊した場合と比較して延焼拡大速度に差がみられなかった。

なお、延焼速度の減少率と縮尺との間に相関は見出せなかった。

(4) 家屋の倒壊がその外の燃焼要因におよぼす影響

建物が倒壊していない場合と、倒壊した場合の燃焼速度(重量減少速度)、発熱速度、炎からの放射エネルギー及び倒壊した場合のそれらの減少率を表3に示した。また、各項目の時間的変化を図7~図9に示した。

各項目の時間的な変化では、建物が倒壊していない場合、各建物が延焼する毎にピークが現れるが、倒壊した場合、1つのピークで終わる傾向がみられる。

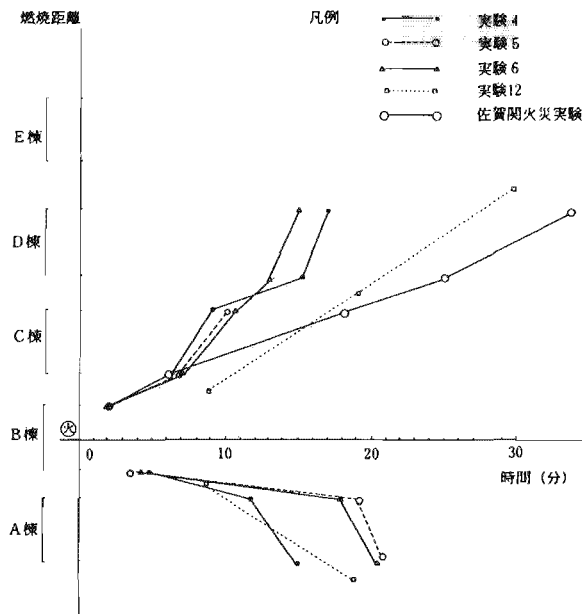
縮尺1/30の模型実験では、いずれの項目も建物の倒壊による影響がほとんど認められなかった。

縮尺1/20の模型実験結果では、倒壊による影響が項目毎にかなり違うことが示された。すなわち、炎からの最大放射エネルギーは、延焼速度と同程度の約50%の減少が認められたのに対し、最大燃焼速度では約16%の減少に留まり、最大発熱速度ではわずかな増加となった。

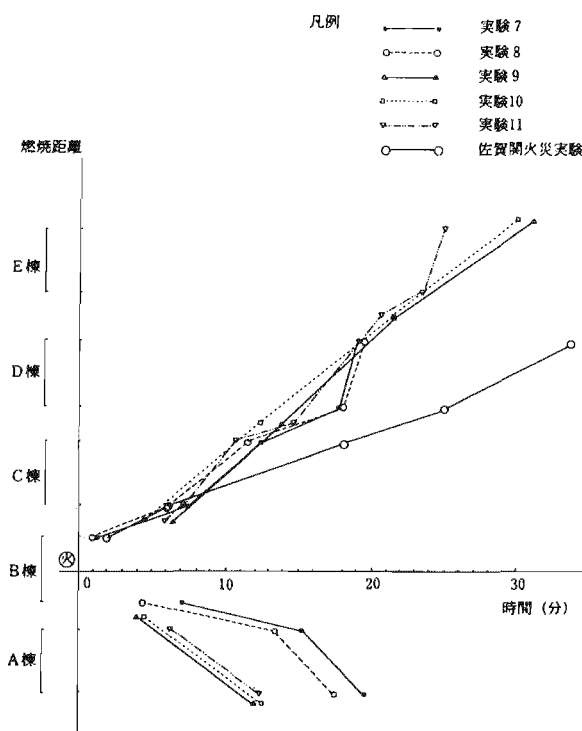
実験6と実験12の発熱速度と炎からの放射エネルギーを比べると、炎からの放射エネルギーの大きさ、すなわち、炎の高さ(炎からの放射エネルギーは、炎の面積と温度の関数であるが、今回の実験では炎の幅はほぼ一定であり、また、炎の温度もほとんど変わらない(写真1参照)ため炎の高さで代表できる)に係らず発熱速度(単位時間当たりの発熱量)がほとんど変わらない。このことは、建物が倒壊した場合、炎が小さくても火災を消火する為には、建物が倒壊していない場合とほぼ同程度の消防力を要することを示していると考えられる。ただし、実験データが不足しているので更に多くの実験検討を要する。

(5) 実大実験と模型実験の比較

実大火災実験では、隣接家屋に対する延焼は全て熱放射による伝熱であった。これに対し、実験1~3の



6-1 縮尺1/20模型



6-2 縮尺1/30模型

図6 時間-延焼距離

表3 建物倒壊の影響

項目	模型の縮尺	倒壊しない場合	倒壊した場合	減少率(%)
燃焼速度 (g/sec)	1/20	19	16	15.8
	1/30	9	9 (8.5)	0 (5.5)
発熱速度 (kJ/sec)	1/20	160	170	△5.9
	1/30	120	120 (120)	0
放射エネルギー (J/sec)	1/20	20000	9600	52
	1/30	7400	7400 (6900)	0
延焼速度 (cm/min)	1/20	7.6~10.3	4.5	40~55
	1/30	3.9~4.1	4.0~4.1	0

注：1. 延焼速度は平均値、それ以外は最大値。
 2. () 内は、一部倒壊の場合。
 3. △は、増加を示す。

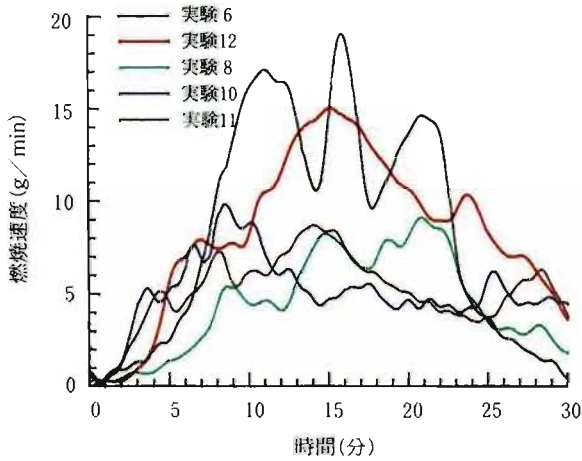


図7 燃焼速度

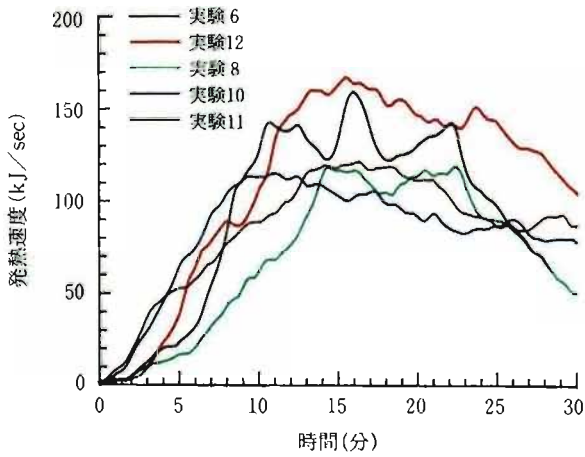


図8 発熱速度

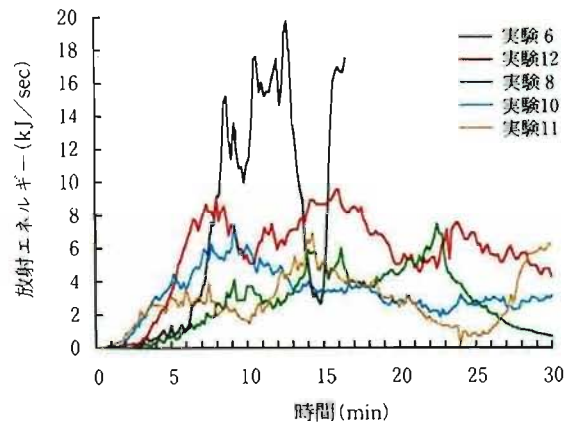
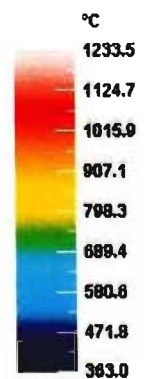
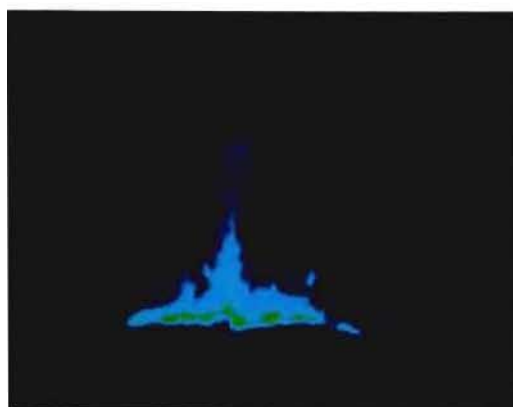
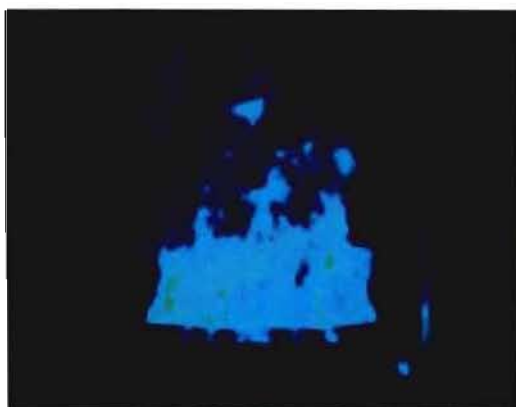


図9 炎からの放射エネルギーの変化



1-1 実験6 (縮尺1/20 未倒壊)
 { 右側帯状の画像は、炎の高さ測定
 用のスケールに炎が反射したもの }

1-2 実験12 (縮尺1/20 全倒壊)

写真1 赤外線画像による炎の形状・温度
 (点火後12分)

結果から分かるように、隣棟間隔を単に建物の縮尺に合わせた模型実験では、火元建物から隣接への放射による着火は全く見られなかった。

この原因は、スケールダウンしたことにより、幾何学的に相似な位置であっても、放射による受熱量が減少したことによるもので、放射受熱量が減少した結果指数関数的に着火までの時間が長くなったこと。また、スケールダウンにより可燃物の量が減少し、建物の燃焼時間が短くなったことが相まって、放射による着火延焼がますます困難となったことによる。

そこで、実験4以降の実験に見られるように、火災建物からの放射による受熱量を増加させるために、建物間隔を近づけると、接炎による着火がおり、実大実験結果と異なる結果となる恐れが生じる。また、仮に放射により着火した場合でも、放射熱量が小さいため着火時間が遅れ、今回の実験で見られたように、火災建物が最盛期を過ぎて燃え落ち、おき火状態に近くなってから着火延焼するなど、実態とかけ離れた現象が現れる。

縮尺約1/10の模型による家屋間延焼実験報告³⁾では、「延焼着火が接炎ではなく飛火または放射によって起こる場合が多い」ことを実験的に確かめている。

このようなことから、放射による延焼拡大を扱う場合、縮尺1/20程度の小規模な模型で扱うことは難しく、少なくとも1/10程度の縮尺の模型が必要であると考えられる。

一方、隣棟間隔が2～3mも離れていない密集地における建物間の延焼の場合には、放射よりも接炎・対流伝熱の影響が大きいと考えられ、そのような場合には比較的小規模な模型による実験も可能と考えられる。その場合にも、延焼速度を定量的に扱うためには、今回の実験では考慮しなかった住戸内の間仕切り、モルタル塗りの壁体、瓦やトタン等で葺いた屋根の防火性を、模型を作成する上でどのように扱うか大きな問題となると考えられる。

5 まとめ

- 1 家屋が倒壊していない場合、縮尺1/30および縮尺1/20の模型実験では、延焼速度は、実大規模相当でそれぞれ約70m/h、78～88m/hであった。佐賀県製錬所火災実験における延焼速度約45m/hと比較し、かなり大きい値となった。
- 2 家屋が倒壊した場合、縮尺1/30の模型実験では倒壊による延焼速度の遅れが見られなかった。縮尺1/20の模型実験では、倒壊しない場合と比較して延焼速度に40～55%の減少が認められた。しかし、実験結果を実

大規模に拡張して適用するまでには至らなかった。

- 3 燃焼速度、発熱速度、炎の放射エネルギーに建物の倒壊が及ぼす影響は、縮尺1/30の模型ではほとんど認められなかった。縮尺1/20の模型では項目によって影響の程度が異なり、最大燃焼速度では約16%、炎からの最大放射エネルギーは50%の減少が認められたのに対し、最大発熱速度ではわずかな増加となった。
- 4 縮小すると幾何学的に相似な位置関係にあっても、放射受熱量が減少するため、放射によって延焼拡大する現象を把握する場合、縮尺1/20程度の小規模な模型を使用して扱うことは難しい。

6 あとがき

市街地火災の延焼性状について縮尺1/20及び1/30の小型家屋模型を使用して燃焼実験を実施したが、小規模な模型では放射が影響する延焼性状の把握は困難であることがわかった。放射が影響する延焼を把握するために、更に大きい模型を使用して燃焼実験を実施することは、施設の関係上無理があるので、今後、比較的小規模な模型でも可能性のある、接炎により延焼拡大する密集地域の火災について、模型を使用した燃焼実験を行い、その延焼性状を把握していく予定である。

参考文献

- 1 自治省消防庁消防研究所「実家屋群による大規模火災対策の研究調査報告書」（昭和55年2月）
- 2 斉藤、吉田「模型による室の燃焼挙動の定量化について」火災、Vol.34 No.3(150) (1984年)、p.12
- 3 山下「模型による家屋間延焼の実験的研究」消防研究所報告、第45号(1978年3月)、p.44