

市街地火災の延焼メカニズム

火の粉による跳躍延焼の解明に向けた一連の研究

防火研究グループ 上席研究員 林 吉彦

目 次

有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験

1. はじめに
2. 火災風洞における実大実験
3. 火災進展と火の粉発生との時系列的関係
4. まとめ

火の粉飛散時の燃烧性状に関するコーンカロリメータ試験

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果
4. 考察
5. まとめ

屋根瓦の脱落に関する阪神淡路大震災後の航空写真を用いた分析

1. 背景と目的
2. 分析の概要
3. 分析結果
4. まとめ

屋根に落下した火の粉の着火性状に関する実規模火災風洞実験

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果
4. 考察
5. まとめ

火の粉飛散範囲の数値シミュレーション

1. はじめに
2. FDS の概要
3. 火の粉飛散時の運動の数値モデル
4. 数値解法
5. まとめ

有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験

1. はじめに

市街地火災において、建物間の延焼を引き起こす要因としては、接炎、放射熱、熱気流、火の粉などが挙げられる。特に、強風下においては、大量の火の粉が原因となっており、火災発生場所から離れた所で飛び火による延焼被害が起こる事例も多い。火の粉および火の粉を原因とした飛び火の研究は、市街地火災の延焼拡大性状を解明する際に重要であるが、これまでは実験施設の制約から系統的、工学的なアプローチが困難であり、火の粉を扱った実験的研究は散見される程度である^{文1)文2)}。

そこで、本研究では、実スケールの防火木造家屋を用いた火災風洞実験を3回実施し、火の粉の解明を試みることにした。特に、火災進展と火の粉発生との時系列的な関係を定量的かつ定性的に把握することを主目的とした。

2. 火災風洞における実大実験

2.1 概要

建築研究所火災風洞(図1)内に実大の供試家屋を設置し、有風火災時の火の粉の発生性状について可能な限り正確に把握するよう努めた。点火方法、風速、防火仕様を変化させてcase1~3の3回の実験を行った。

2.2 試験体の配置

都市ガスバーナー(火元)、クリブ(火元)、供試家屋を図1のように配置した。クリブは家屋より3m程風上側に配置し、家屋と同様2.85m四方とした。case2,3では火の粉採集トレーも配置した(図1)。1m四方のものを2個用意して家屋より2m程風下側に東西に並べて配置している。一方には落下した火の粉の燃焼を止めて形状を維持するために水を張り、もう一方は空にして、火の粉の燃え尽きの程度を把握できるようにした。case1ではトレーは設置せず風洞の床面に水を撒き、1m四方のエリア(図1中の点線四角)から火の粉を実験後に収集した。

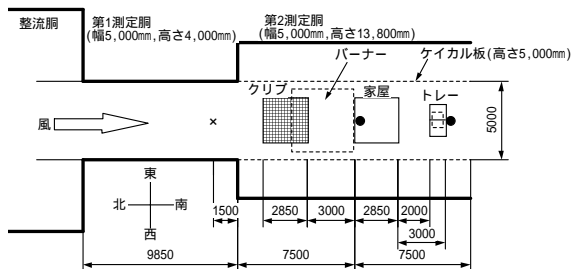


図1 火災風洞内配置図 (単位: mm)

2.3 実験条件

表1に実験条件を記す。供試家屋はいずれも防火木造であるが、case1,2では和風、case3では洋風の仕様とした。図3に断面図、図4に軒の拡大図、図5に平面図を示す。室内可燃物は、その配置を図6に、リストを表2に示す。単位面積当たりの質量は30(kg/m²)となっている。火元として、case1では都市ガスバーナーを用い、case2,3ではクリブを燃焼させた。クリブの材質はアカマツで、30×40×2,850(mm)の寸法のを井桁状に積み重ねた。case1では家屋開口(普通ガラス)を締め切った状態でバーナーに点火し、50分後に南側開口の東半分を開放した。case2,3では北側開口は締め切り、南側開口は東半分を開放した状態でクリブに点火した。case1では大型の都市ガスバーナーの流量が安定した後に風を起こし、風速が安定した時点で実験開始とした。case2ではクリブ点火時を実験開始とし、2分後に風を起こしたが、クリブ燃焼に伴う巻き込み流により風速が増加した。case3では風速が2(m/s)に達した後、クリブに点火を行って実験開始とした^{注2)}。

表1 実験条件

実験 case	供試家屋	風上火災家屋	風速
case1	和風 ※1	都市ガスバーナー ※3	2.4m/s
case2	和風 ※1	木材クリブ ※4	0~12m/s
case3	洋風 ※2	木材クリブ ※5	3.8m/s

※1 床:畳、外壁:モルタル、屋根:瓦

※2 床:フローリング、外壁:サイディング、屋根:カラーベスト

※3 火源面:4m×4m、発熱速度:0.38MW/m²

※4 サイズ:2.85m×2.85m×1.48m、発熱速度:2.34MW/m²

※5 サイズ:2.85m×2.85m×0.72m、発熱速度:1.12MW/m²

2.4 測定項目

火災風洞内に小型 CCD カメラを多数設置して様々な位置から供試家屋の燃焼や火の粉の発生を撮影した。熱線風速計(平均風速計)を case1 では測定胴境界(図1△)、case2,3 では境界より1.5m風上(図1×)、いずれも床上高さ1.5mの位置に設置して流入風速を計測した。熱電対は、家屋では、木造躯体の各部材、内外壁、軒、小屋裏及び室内外空間温度等を測定する目的で58箇所(図3~5●)、case2,3のクリブでは、外周と中心にも7箇所設置して温度計測を行った。熱流束計は家屋の北側開口内側とトレー南側(図1中の●、2点とも家屋床上高さ1.4m)に設置して隣棟火災からの入射熱を測定した。case3ではロードセルを家屋下部に設置して質量減少を計測した。

表2 可燃物リスト

可燃物	寸法	材質	質量	個数
テレビ	358×355×323	プラスチック	8.165	1
テレビ台	530×450×433	木質	9.223	1
カラーボックス	430×294×870	プラスチック	14.402	2
テーブル	750×500×330	木質	6.956	1
座椅子	550×500×600	ナイロン	5.703	2
タンス	867×465×878	木質	30.219	1
座布団	550×590	ナイロン	3.860	4
本棚	610×294×1782	木質	31.084	2
新聞紙		紙	113.975	

3. 火災進展と火の粉発生との時系列的関係

3.1 実験結果

case1～3の入射熱と南壁西側(図5、床上高さ1.4m)温度、case3の開口内側温度と家屋の質量変化の結果を図7～14に示す。

3.2 火災進展の推定

case1～3の実験結果を基に火災の進展を推定した(表3～5)。

表3 case1における火災の進展状況

時間	火災の進展状況
0分	風速が安定する
5分	北壁の開口下部に亀裂が入る
10分	北壁全面からモルタルが剥がれ始める
15分	室内を煙が充滿し始める
50分	・南側開口の東半分を開放 ・直後に黒煙が発生し始める
65分	・バーナーの炎が北壁開口下部を破壊して家屋への延焼が引き起こされた ・直後にバーナーを停止させた ・北側屋根が燃え始める
68分	フラッシュオーバー
70分	南側から開口噴出火災が発生する
75分	北壁開口上部、北側軒が崩壊
80分	・屋根が燃え抜けたが、母屋は残存 ・南壁開口上部に亀裂が入る
85分	東壁北側が割れ始める
90分	南側軒、南壁開口上部が崩壊
100分	北側母屋が崩壊
105分	中央の母屋が崩壊
125分	南側桁が崩壊
130分	南壁開口下部が崩壊

表4 case2における火災の進展状況

0分	クリブに点火(風速:0m/s)
2分	風洞内の電動機回転数を630(回転/分)に設定して以後一定
2分30秒	クリブ北側中心付近から炎が吹き上がる
3分	クリブ北側全体から巨大な炎が吹き上がり、家屋屋根の高さを上回る
3分30秒	クリブの南側も燃え始め、炎がさらに拡大し、屋根の上面を流れ始める
4分20秒	クリブの炎が家屋北開口を破って侵入
6分	家屋の南壁以外の壁面と屋根がクリブからの炎に包み込まれる
6分30秒	家屋南側から開口噴出火災が発生する
10分	家屋室内で炎が天井を貫通する
15分	北屋根が激しく燃え南屋根が少し燃える 北西軒が崩壊し、北壁が崩れ始める
20分	南屋根が激しく燃えて、瓦が崩れ始める 北東軒が崩壊、北壁がほぼ崩壊
25分	屋根が消滅して母屋だけが残る

表5 case3における火災の進展状況

0分	クリブに点火(風速:2m/s)
13分	風速を3.8m/sに増加
20分	延焼する前にクリブがほぼ燃え尽きる
20分45秒	室内に強制点火(北東隅に新聞紙を入れたゴミ箱を設置)
21分50秒	ゴミ箱に新聞紙追加開始
22分55秒	新聞紙の追加を終了
29分	室内で炎が拡大し始める
29分30秒	南東側のカラーボックスが燃焼し始める
30分	南側開口から黒煙が発生し始める
49分45秒	床、テーブルが燃焼し始める
49分55秒	西側本棚の足元が燃焼し始める
50分	フラッシュオーバー
55分	南側から開口噴出火災が発生する
60分	炎が天井を貫通して東、母屋に到達する 開口噴出火災が拡大する(南側)
65分	開口噴出火災が軒、屋根に到達する
75分	屋根が燃え抜け始める
80分	家屋が崩壊し始める 南側:軒、開口より上の壁面、屋根が崩壊 北側:開口より上の壁面、屋根が崩壊
85分	南側:開口より下の壁面も崩壊 北側:軒が崩壊
90分	西壁の南側が崩れ始める
100分	屋根材が完全に崩壊した 南東端、南西端の垂木が崩れる
105分	北東端、北西端の垂木も崩れる

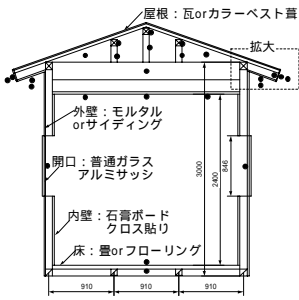


図3 断面図

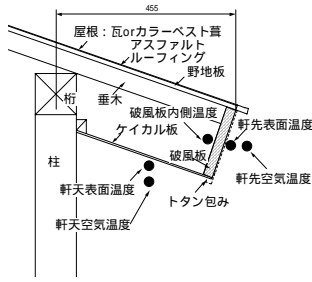


図4 軒の拡大図

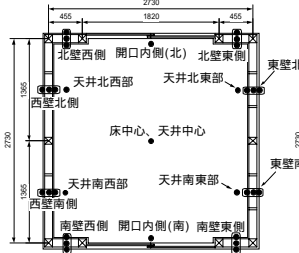


図5 平面図

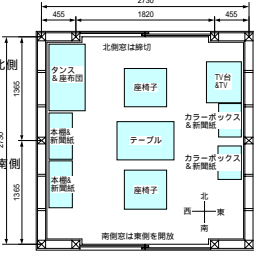


図6 可燃物配置図

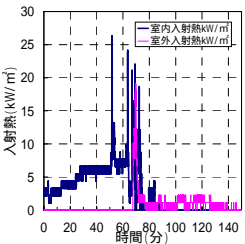


図7 入射熱 (case1)

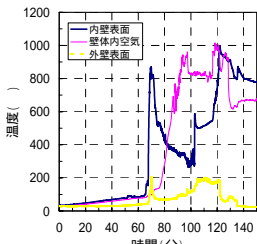


図8 南壁西側温度 (case1)

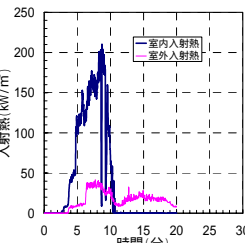


図9 入射熱 (case2)

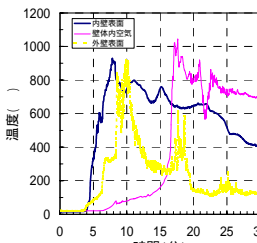


図10 南壁西側温度 (case2)

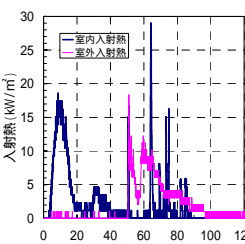


図11 入射熱 (case3)

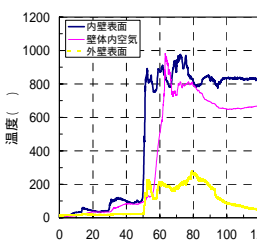


図12 南壁西側温度 (case3)

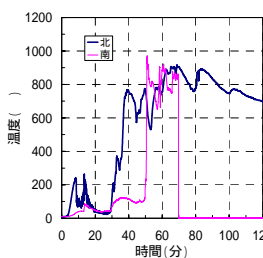


図13 開口内側温度 (case3)

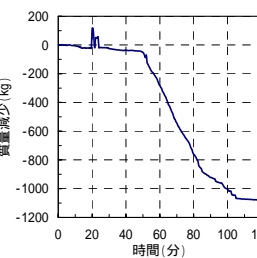


図14 家屋の質量変化 (case3)

case3 の場合、図 14 より 50~80 分の質量変化は 710.2 (kg) であり、木材の発熱量 17.76 (kJ/g) を用いると家屋のおよその発熱速度は 0.94 MW/m² となる。

既往の調査結果よりやや小さめの値を呈した。参考に、家屋の初期計量値は 2329 (kg) であった。

3.3 トレー内から収集した火の粉の情報

(1) 大きさの分類と質量計測

火災家屋から発生した火の粉は大別して消炭状の物と灰状の物があつたが、case1 では風洞床面の所定のエリア、case2, 3 ではトレー内に蓄積した火の粉を実験後に全て採集した上で、今回は消炭状の火の粉について大きさと質量を計測した。case2, 3 では水無しトレー内から採集した火の粉はそのまま計測を行ったが、水入りトレー内から採集した火の粉は十分に乾燥させた後に計測を行った。まず、火の粉を水平な場所に安定するように置いた際の投影面積を基に大きさの分類を行い、分類毎の個数と総質量を表 6, 8, 10 に示した。なお、5cm 毎のグリッド上に載せた case2 の火の粉(LL) の見本を写真 1 に示している。次に、全ての消炭状火の粉について 1 個毎の質量も計測し、平均、分散、標準偏差を求めた。トレー毎、大きさ分類毎の全ての結果を表 7, 9, 11 に示した。case2 水入りトレー内火の粉(SS) に関しては、個数が非常に多いため質量計測は現時点では困難な状況にある (表 9)。

表6 火の粉の総質量

分類	面積(cm ²)	数	総質量
L	4以上	16	6.29
M	2~4	35	5.18
S	1~2	35	2.87
SS	0.25~1	21	0.65
合計→		107	14.99

表7 火の粉の質量

	L	M	S	SS
平均(g)	0.39	0.15	0.08	0.03
最大値(g)	0.84	0.37	0.18	0.11
最小値(g)	0.18	0.05	0.03	0.01
分散	0.03	0.01	0.00	0.00
標準偏差	0.16	0.08	0.03	0.02

表8 火の粉の個数と総質量 (case2)

	面積(cm ²)	数		総質量	
		水入	水無	水入	水無
LLL	25以上	3	0	11.57	0
LL	9~25	12	0	13.88	0
L	4~9	48	14	20.30	4.21
M	2~4	178	45	25.99	5.90
S	1~2	457	105	24.10	4.83
SS	0.25~1	多数	64	-	1.47
合計→		-	228	-	16.41

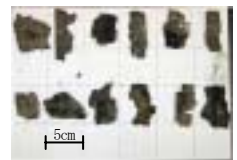


写真1 採取火の粉 (case2、LL)

表9 火の粉の質量 (case2)

	LLL		LL		L		M		S		SS	
	水入	水無	水入	水無	水入	水無	水入	水無	水入	水無	水入	水無
ave	3.86	1.16	0.42	0.30	0.15	0.13	0.05	0.05	-	-	0.02	0.02
max	4.81	2.05	1.00	0.51	0.44	0.32	0.25	0.12	-	-	0.06	0.06
min	2.86	0.52	0.08	0.14	0.04	0.03	0.01	0.01	-	-	0.01	0.01
σ ²	0.63	0.19	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00
σ	0.80	0.43	0.20	0.09	0.08	0.07	0.03	0.02	-	-	0.01	0.01
num	3	12	48	14	178	45	457	105	多数	64		

表 10 火の粉の個数と総質量 (case3)

	面積 (cm ²)	数		総質量	
		水入	水無	水入	水無
L	4以上	1	4	0.33	1.09
M	2~4	15	10	1.62	1.44
S	1~2	44	15	1.67	0.75
SS	0.25~1	308	33	2.77	0.56
合計→		368	62	6.39	3.84

表 11 火の粉の質量 (case3)

	L		M		S		SS	
	水入	水無	水入	水無	水入	水無	水入	水無
ave	0.33	0.27	0.11	0.14	0.04	0.05	0.01	0.02
max	0.33	0.41	0.27	0.25	0.08	0.13	0.06	0.05
min	0.33	9.09	0.05	0.06	0.01	0.02	0.00	0.00
σ^2	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
σ	0.00	0.14	0.05	0.06	0.02	0.03	0.01	0.01
num	1	4	15	10	44	15	308	33

(2)火の粉の発生性状の比較

case2, 3 を比較すると(表 8, 10)、個数に関しては水入りトレー、水無しトレー共に case2 の方がはるかに多い。大きさに関しては、case2 水入りでは LLL, LL に分類される非常に大きな火の粉が複数採集され(写真 1)、火災の激しさを反映した結果となったが、小さい火の粉ほど相対的に多いという点では case3 と同様であった。分類毎の総質量に関しては、case2 の方が大きいという結果になった。火の粉 1 個毎の平均質量に関しては(表 9, 11)、水無しトレー内の M, S 以外は case2 の方が大きいという結果になった。

case2 におけるトレー毎の比較をすると(表 9)、1 個毎の平均質量は L, M, S 共に水入りトレー内の方が大きい結果になった。一方 case3 では(表 11)、M, S, SS の 1 個毎の平均質量は水無しトレー内の方が大きい結果になった。

3.4 火災進展と火の粉発生の対応

case1 ではフラッシュオーバー(実験開始後 68 分)以後に火の粉が発生しており、それ以前は火の粉の発生が見られなかった(写真 3, 4)。case2 では火災の勢いが非常に激しく、クリブ点火後 5 分前後で大部分のカメラが使用不可となったため、火の粉の発生状況を捉えることができなかった。case3 ではビデオ画像を基に(写真 5, 6)、各トレーの 1/4 の部分内の火の粉個数(消炭状、灰状全て)の増加状況を目視で数えた結果を図 15 に示した。最初の増加が始まるのは 35 分の時点だが、これは 30 分に南側開口から黒煙が発生した事が起因していると思われる。次の増加は 55 分に急激に起こったが、これは 50 分のフラッシュオーバーの際に、室内を舞っていた収納可燃物に由来する灰状火の粉が一気に外部に噴出したものと思われる。60 分以降は緩やかに増加していくが、ここからは木造躯体に由来する消炭状火の粉

も発生し始めたものと考えられる。家屋が崩壊し始めた時や屋根が燃え抜け始めた時にも火の粉の増加が見られた。なお、水入りトレー内の火の粉発生と火災進展の対応の詳細は表 12 に記したが、表中の火の粉の増加とは 5 分前の時点での火の粉の個数と比較した値を意味している。



写真 3 65 分南側屋根



写真 4 70 分南側屋根(case1)

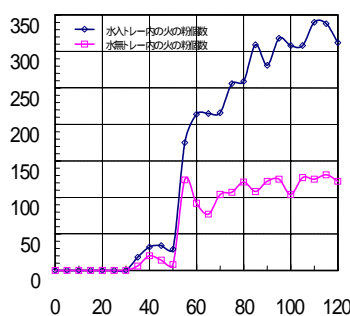


図 15 トレー内火の粉の個数 (case3)

※縦軸：個数、横軸：時間(分)



写真 5 50 分水入りトレー(case3)



写真 6 55 分水入りトレー(case3)

表 12 火の粉発生と火災進展の対応 (case3 水入りトレー内)

火の粉の発生		火災の進展状況	
時間	増加	時間	要因と思われる現象
55 分	+146	50 分	フラッシュオーバー
85 分	+ 50	80 分	家屋が崩壊し始める
75 分	+ 40	75 分	屋根が燃え抜け始める
60 分	+ 39	55 分	開口噴出火災が発生(南側)
95 分	+ 37	90 分	西壁の南側が崩れ始める
110 分	+ 32	105 分	北東、北西端の垂木が崩壊
35 分	+ 18	30 分	開口から黒煙が発生(南側)

4.まとめ

(1)火の粉発生と火災進展の時系列的な関係を実大実験から捉える事ができた。火の粉の発生を促進する火災の進展現象としては、フラッシュオーバーの発生、部材(屋根、壁、垂木など)の崩壊、開口噴出火災や煙の発生等を挙げることができる。

(2)有風下の火災家屋(防火木造)から発生した火の粉を実験後収集して、形状と質量を計測し、火の粉の加害性を解明

する手掛かりを得た。

(3) ケース毎の火の粉発生量の比較から、風速は大きい場合の方が、また仕上げ材は洋風より和風の場合の方が、より多くの火の粉が発生することが定量的に把握された。

5. 今後の課題

(1) 今回の実験結果をベースとして、風速、構造、可燃物等の条件を変化させて引き続き火災風洞実験を行い、条件の違いが火の粉発生に及ぼす影響をより詳細に比較検討する。

(2) 火の粉の延焼加害性をより具体的に把握するために、収集した火の粉をより詳細に分析する。飛散性状、着火性状についても火災風洞を用いた実大実験や模型実験を実施して解明を試みる。

注 1) 表1中の風速はcase1は0~100分の平均値、case2は0~30分の値の幅、case3は30~105分の平均値である。仮想隣棟火災家屋の発熱速度はcase1は0~60分、case2は0~15分、case3は0~20分の平均値である。case2,3では火災継続時間と木材発熱量から推測した。2) 点火後13分に3.8(m/s)に設定し直したが、クリブ燃焼はすでに減衰しており、家屋への接炎を引き起こせなかった。

参考文献 1) 石原慶大, 富田裕之, 赤羽根信行, 田中孝義, 若松孝旺: 火の粉の飛散に関する基礎的研究, 日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 162-165, 1996 2) 浜田稔, 若松孝旺: 屋根こけら板にタバコのすいがらを落とした場合の出火の可能性について, 日本火災学会論文集第11巻第2号, pp. 40-48, 1961

火の粉飛散時の燃焼性状に関するコーンカロリメータ試験

1. はじめに

火の粉による飛び火現象は複雑である。その全容を把握するには、火の粉の「発生」、「飛散」、「着火」の3つのフェーズに分け、各々を実験的、数値的に解明した後、それらを融合するのが良い。火の粉の「飛散」に関しては、飛散範囲を予測することが重要である。また、落下時の熱的加害性を明らかにする必要もある。本研究は、コーンカロリメータ試験を実施し、火の粉に見立てた木材試験体の燃焼性状と質量変化を計測し、「飛散」解明の手掛かりとした。

2. 実験概要

2.1 実験装置

(財)ベタリービング筑波建築試験センター内のコーンカロリメータ(写真1)を使用した。



写真1 コーンカロリメータ



写真2 映像記録機器の配置

2.2 実験条件

木材試験体は、アカマツ材を切り出し、一辺2cmまたは3cmの立方体形状とした。形状と大きさは、火の粉に関する既往の調査^{文1)}や実験^{文2)}を参考に決定した。試験体は、温度23.0℃、湿度50%で養生した後、コーンカロリメータにセットした。この際、加熱部から試験体上面までの距離を25mmとし、木目の向きにも配慮した(写真3)。50kW/m²_{注1)文3)}で加熱し、加熱時間は、常時加熱、または、着火した瞬間に加熱を中止した。表1に実験条件を記す。同一の条件下で2回の実験を行った。ただし、試験体サイズは目標値であり、厳密でないため、初期質量にはばらつきが現れている。

表1 実験条件

	試験体一辺長 (cm)	加熱条件 (50kW/m ²)	初期質量 (g)
case1-1	3	常時加熱	12.07
case1-2	"	常時加熱	9.94
case2-1	"	着火した瞬間に加熱 中止	14.15
case2-2	"	着火した瞬間に加熱 中止	10.78
case3-1	2	常時加熱	3.26
case3-2	"	常時加熱	2.55
case4-1	"	着火した瞬間に加熱 中止	2.86
case4-2	"	着火した瞬間に加熱 中止	2.32



写真3 試験体(3cm角)



写真4 試験体(2cm角)

2.3 測定項目

コーンカロリメータにより、発熱速度、質量変化を計測した。コーンカロリメータの脇には、デジタルカメラと赤外線放射カメラを配置し（写真2）、試験体の燃焼状態の録画と温度変化を計測した。目視により、①着火時間、②表面炭化時間（炭化の早い面について）、③表面炭化時間（炭化の遅い面について）、④消炎時間、⑤無炎燃焼終了時間を計測した^{注2)}。

3. 実験結果

目視による結果を表2に、発熱速度と合計発熱量の結果を図1～16に示した。なお、表2中の①～⑤は、2.3測定項目に記載したものである。

表2 目視による結果（単位：秒）

	①	②	③	④	⑤
case1-1	5	30	40	377	877
case1-2	7	37	55	350	947
case2-1	7	—	526	928	990
case2-2	4	235	400	670	916
case3-1	5	12	22	171	685
case3-2	8	13	27	151	552
case4-1	4	27	55	199	605
case4-2	5	129	135	231	667

4. 考察

4.1 火の粉の燃焼性状に関して

実際の建物火災では、火の粉が生成するのは、収納可燃物や躯体を構成する木材が、火災盛期に相当する加熱を受けて着火し、表面が炭化した以降と考えられる。表面炭化以降は、木材の靱性が弱まり、力学的な衝撃を受けて、剥離しやすくなるためである。しかしながら、火の粉生成をもたらすのに必要な炭化厚さがわからないので、ここでは、安全側の評価となるように、表面炭化と同時に、具体的には、炭化の遅い面^{注2)}が表面炭化したと同時に、火の粉が生成すると仮定する。また、生成した火の粉は、10m/sの気象風速下で、1,000m移流され、落下するものとする。このような前提の下、実験結果を基に、飛散火の粉の燃焼性状について考察する。ただし、case1-1とcase3-1は、炭化（飛散開始に対応）後も加熱を続けており、その結果を基に実際の火の粉の燃焼性状を考えると、物理的に厳しい状況下で論じることになる。一方、case2-1とcase4-1は、炭化以前に加熱を中止しており、その結果を基に実際の火の粉の燃焼性状を考えると、物理的に緩い状況下で論じる

ことになる。ここでは、実際の火の粉の燃焼性状に対して、両者の結果を基に、幅を持たせて論じることとする。

コーン試験結果と各々に対応する火災イベントを図17～20に示した。3cm角の火の粉の場合（case1-1, case2-1）、コーン試験開始から40～526秒で表面が炭化した。その14～76秒後に発熱速度のピークに達した。その値は0.3～0.7kWである。表面炭化から100秒後（コーン試験開始から140～626秒）の発熱速度は0.3～0.4kW、合計発熱量は70～100kJである。コーン試験終了時（コーン試験開始から1200秒）の合計発熱量は190kJ程である。以上を火災イベントに対応させると、F0直後の盛期火災開始から40～526秒で飛散を開始し、飛散開始から100秒後に落下したときには、発熱速度のピーク値を超えており、高々0.3～0.4kWの発熱速度になっている。また、落下から燃え尽きるまでの574～1060秒の間に90～120kJの熱量を放出することになる。なお、case2-1では、着火から表面炭化までは火災盛期に相当する加熱を受けていないことから、躯体内の木材が一時的な加熱を受けて着火した後、自らの燃焼のみで表面炭化するに至ったものが火の粉として生成した場合の燃焼性状を示しているとも言える。

2cm角の火の粉の場合（case3-1, case4-1）、3cm角の場合と同様に考えると、F0直後の盛期火災開始から22～55秒で飛散を開始し、飛散開始とはほぼ同時に発熱速度のピークを示し、飛散開始から100秒後に落下したときには、高々0.15～0.21kWの発熱速度となっている。また、落下から燃え尽きるまでの602～917秒の間に30～40kJの熱量を放出することになる。なお、case4-1では、case2-1と同様に、着火から表面炭化までは火災盛期に相当する加熱を受けていないことから、躯体内の木材が一時的な加熱を受けて着火した後、自らの燃焼のみで表面炭化するに至ったものが火の粉として生成した場合の燃焼性状を示しているとも言える。

以上より、同じ距離を同じ時間で飛散した場合、3cm角の火の粉の方が落下後の加害性が大きいと言える。実際には、3cm角では、飛散距離、飛散時間もともに短くなるので、落下後の加害性はより大きくなると考えられる。

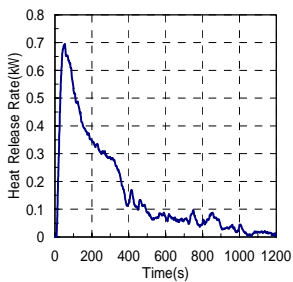


図1 発熱速度 (case1-1)

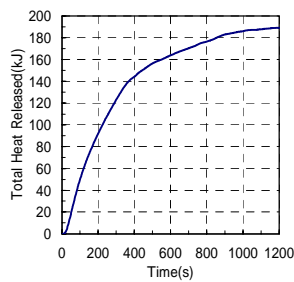


図2 合計発熱量 (case1-1)

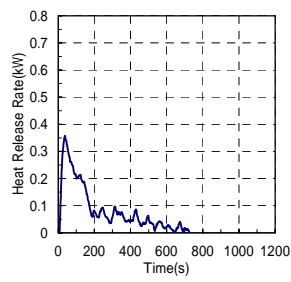


図9 発熱速度 (case1-1)

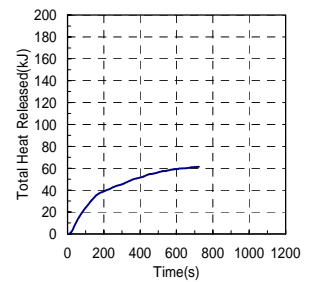


図10 合計発熱量 (case1-1)

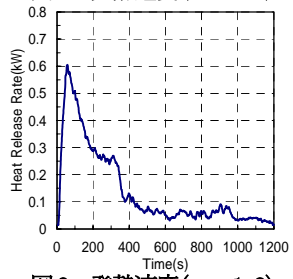


図3 発熱速度 (case1-2)

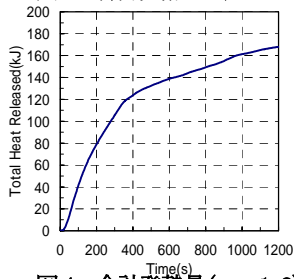


図4 合計発熱量 (case1-2)

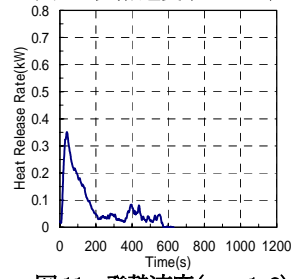


図11 発熱速度 (case1-2)

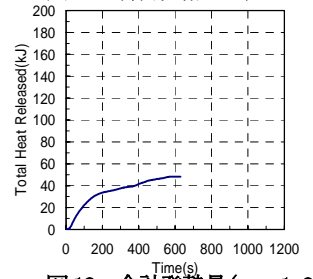


図12 合計発熱量 (case1-2)

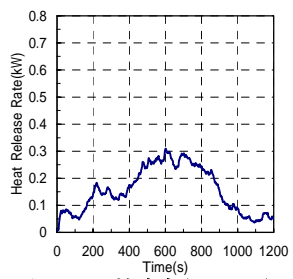


図5 発熱速度 (case2-1)

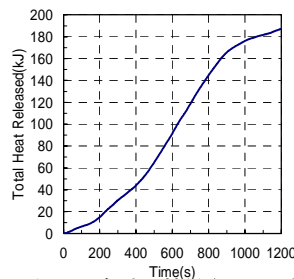


図6 合計発熱量 (case2-1)

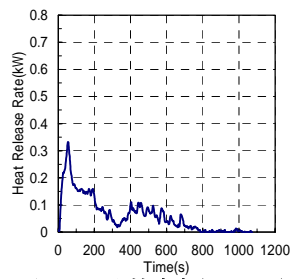


図13 発熱速度 (case2-1)

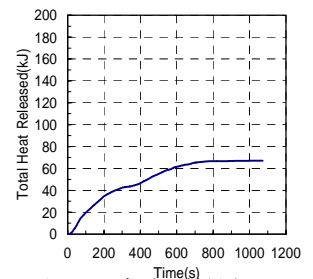


図14 合計発熱量 (case2-1)

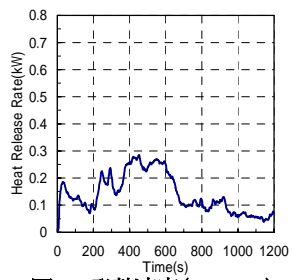


図7 発熱速度 (case2-2)

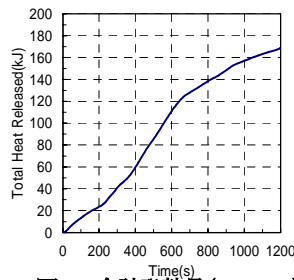


図8 合計発熱量 (case2-2)

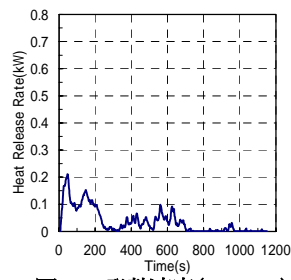


図15 発熱速度 (case2-2)

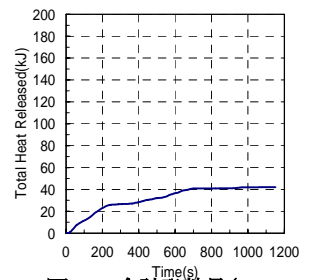


図16 合計発熱量 (case2-2)

4.2 火の粉の質量変化に関して

質量変化に関するコーン試験の一例として、3cm 角で常時加熱の場合 (case1-2) の結果を図 21 に示す。試験開始から 200 秒間の質量減少速度はほぼ一定であるから、飛散開始に対応する 40 秒から落下に対応する 140 秒までの質量減少速度もほぼ一定となる。40 秒 (飛散開始に対応) の質量が 8.3g、140 秒 (落下時に対応) の質量が 4.8g であるの

で、この間の質量変化速度は、 -0.035g/s となる。目視観察によると、コーン試験中の試験体の大きさの変化は認められなかったため、飛散開始から落下までの密度は、 0.31g/cm^3 から 0.18g/cm^3 まで変化することになる。飛散火の粉には、密度変化がないと仮定した場合に比べて、外力の影響が大きく変化して、飛散範囲の予測結果も大きく異なるものと思われる。

次に、2cm 角で、着火した瞬間に加熱を中止した場合 (case4-1) の結果を図 22 に示す。試験開始から 200 秒間の質量減少速度はほぼ一定であるから、飛散開始に対応する 55 秒から落下に対応する 140 秒までの質量減少速度もほぼ一定となる。55 秒 (飛散開始に対応) の質量が 2.2g、155 秒 (落下時に対応) の質量が 1.1g であるので、この間の質

量変化速度は、 -0.011g/s となる。目視観察によると、コーン試験中の試験体の大きさに変化は認められなかったので、飛散開始から落下までの密度は、 0.28g/cm^3 から 0.14g/cm^3 まで変化することになる。3cm 角の場合と同様、密度変化がないと仮定した場合に比べて、飛散範囲の予測結果は大きく異なるものと思われる。

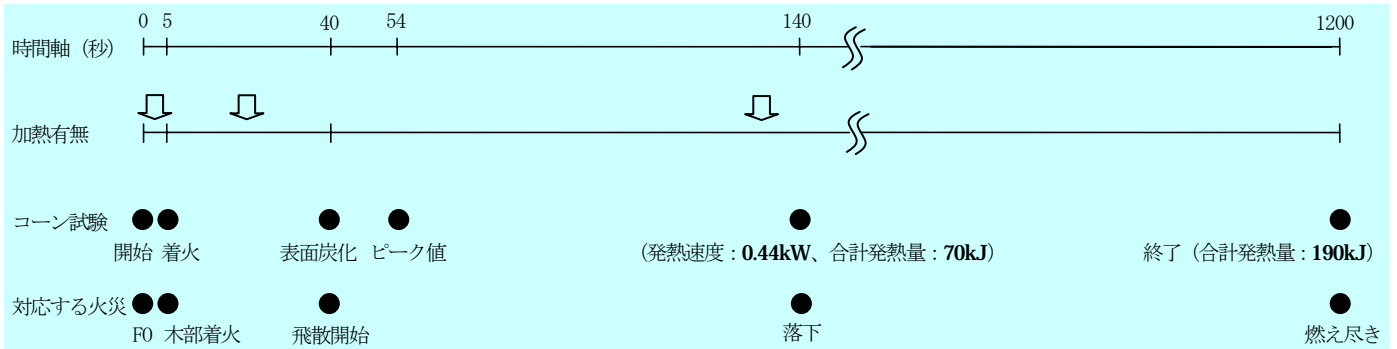


図 17 コーン試験と対応する火災の関係 (case1-1)

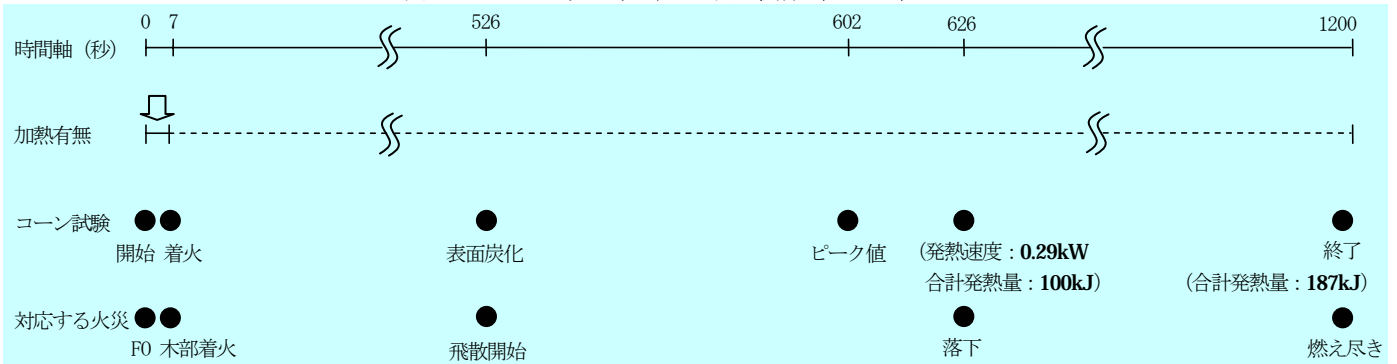


図 18 コーン試験と対応する火災の関係 (case2-1)

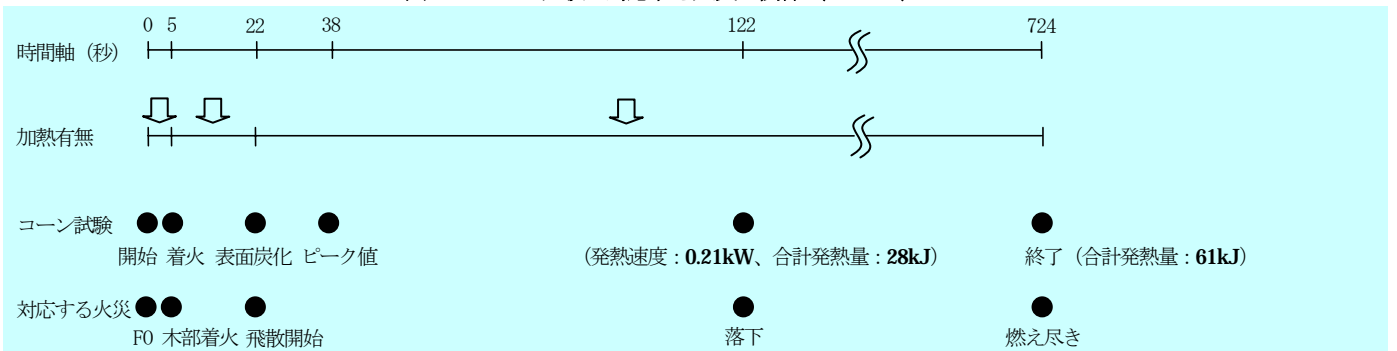


図 19 コーン試験と対応する火災の関係 (case3-1)

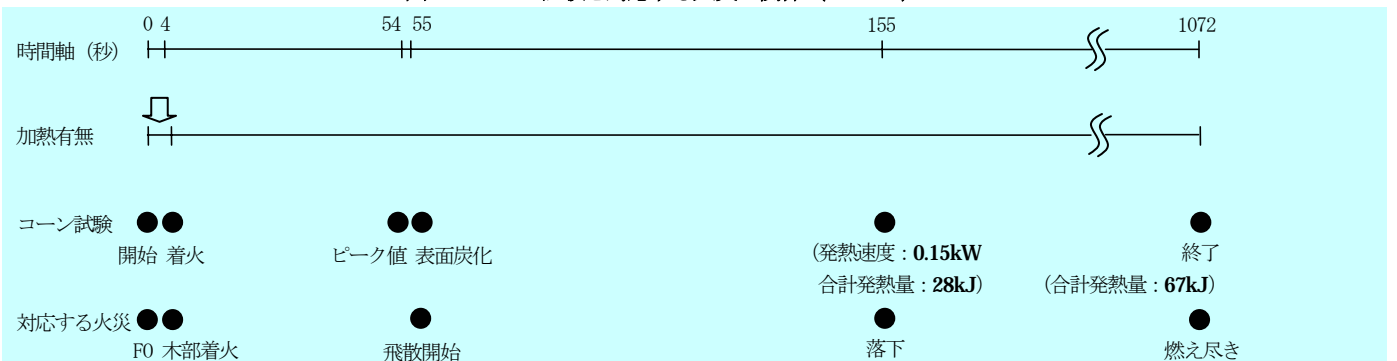


図 20 コーン試験と対応する火災の関係 (case4-1)

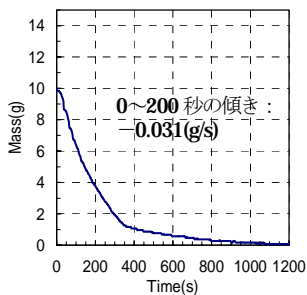


図21 質量変化(case1-2)

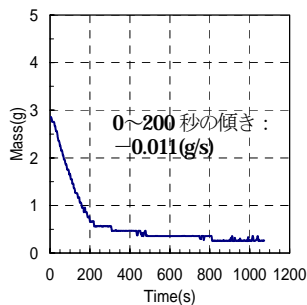


図22 質量変化(case4-1)

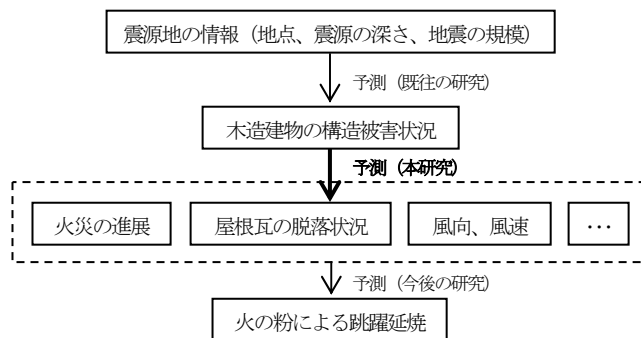


図1 本研究の位置づけと成果の将来活用

5. まとめ

コーンカロリメータを用いた実験結果から飛散中の火の粉の状態を推測した。今後は、温度変化に関しても考察を行い、CFDに応用させていく予定である。

注 1) 火災盛期の火災室内では、 $100\text{kW}/\text{m}^2$ 程度 of 受熱が観測される。今回は、コーンカロリメータに負担をかけないため、通常の試験業務での加熱としたが、今後、可能な範囲で、条件を見直していく。2) 目視では、試験体手前側の2つの側面を観察できた。両者の表面炭化時間にはラグがあり、早い面の場合を②、遅い面の場合を③とする。

参考文献 1) 大宮喜文、岩見達也：建物火災に伴う火の粉の飛散と飛び火に関する実態調査、日本建築学会技術報告集第9号、pp. 133-136、1999 2) 吉岡英樹、林吉彦他：有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験、日本火災学会発表要旨概集、pp. 376-379、2003 3) 長谷見雄二：火事場のサイエンス、井上書院、pp. 55-56、1988

屋根瓦の脱落に関する阪神淡路大震災後の航空写真を用いた分析

1. 背景と目的

大規模な地震直後には、同時多発火災が発生し、そのいくつかは市街地火災に進展し得る。特に、強風下においては、大量の火の粉が発生し、遠く離れた所に飛散し、飛び火による新たな延焼を招く。過去の大火事例によると、飛び火被害を受けるのは、屋根が最も多い。これは、大地震直後には、屋根瓦が脱落して、屋根を構成する木材が露出するためと考えられる。飛び火被害の潜在的危険性を考えるうえで、地震直後の屋根瓦の脱落状況を予測しておくことが重要となる。

現状では、ある地域について、震源地の情報(地点、震源の深さ、地震の規模)を基に、構造別、構造被害の程度別に、構造被害棟数の予測が可能である。本研究は、これをさらに発展させ、木造建物の構造被害程度別、屋根瓦被害の程度別に、屋根瓦被害棟数の予測を可能とすることを目指す。本成果は、将来的には、CFD (Computational Fluid Dynamics、計算流体力学)を用いた火の粉による跳躍延焼シミュレーションモデルの初期条件として、屋根瓦の脱落状況の設定に活用していく予定である(図1)。

2. 分析の概要

2.1 分析方法

調査対象地区として、1995年1月の阪神淡路大震災時にとりわけ多くの被害が発生した兵庫県神戸市灘区および東灘区(約63平方km)内で、建物の構造被害が小さい地区と大きい地区を各々3箇所ずつ計6箇所を選定した(図2)。第1, 3, 4地区が構造被害の小さい地区、第2, 5, 6地区が構造被害の大きい地区である。

調査対象地区内の同一の建物について、屋根瓦の脱落程度と構造被害の程度との関係を明らかにした。屋根瓦の脱落程度については、震災後に上空から撮影された航空写真(写真1, 写真2)を基に1棟ごとに目視で判断した。構造被害程度に関しては、建築研究所が震災直後に現地を実施した、1棟ごとの建物の構造被害調査結果^{文1)文2)注1)}を参照した。なお、本分析では、木造建物で瓦葺屋根のものを対象とする。その棟数は、第1, 3, 4地区が302, 191, 130棟、第2, 5, 6地区が336, 156, 315棟であり、いずれの地区においても全棟数に対して大半を占めている。

2.2 屋根瓦の脱落程度区分

屋根瓦の脱落程度のカテゴリとしては、「被害なし」、「被害半分以下」、「被害半分以下全部未済」、「被害全部」、「屋根崩壊」、「ブルーシート」の6段階である。「被害全部」とは、屋根は残っているが瓦がすべてなくなり、野地板やアスファ

ルトルーフィングが露出した状態を指す。「屋根崩壊」とは、屋根自体が崩れている状態を意味する。「ブルーシート」とは、屋根の上にブルーシートを被せてある状態であり、かなりの被害を受けているものと推測される。

2.3 構造被害の想定手法について

地震による建築物の構造被害の想定は、各都道府県ごとに行われている。例えば、東京都の場合^{文3)}は、以下の手順により、対象地域内の構造被害棟数を予測する(注2)。

- (1) 都内を500m×500mの地域に分割する。
- (2) 液状化しない地域と液状化する地域とでは、建物被害の様相が異なるので、各地域がいずれか判定する。
- (3) 液状化しない地域では、ゆれと被害との関係式を用い、構造別、構造被害程度別の棟数を求める。
- (4) 液状化する地域では、液状化と被害とゆれとの関係式を用い、構造別、構造被害程度別の棟数を求める。

3. 分析結果

3.1 全体的傾向

木造建物の構造被害程度と屋根瓦脱落程度との関係は、構造被害の小さい地区と構造被害の大きい地区とで大きく異なっている(図4.1, 図5.1)。しかしながら、木造建物の構造被害程度別に屋根瓦脱落程度の各割合を見ると、両者に大きな違いは見られない(図4.2, 5.2)。構造被害の小さい地区では、「全壊または大破」の数は圧倒的に少なく(図4.1)、構造被害の大きい地区では、「外観上の被害なし」の数は少ない(図5.1)。このような場合においても、屋根瓦脱落程度の各割合は、両者で大きな違いが見られないことは興味深い(図4.2, 5.2)。

以下では、木造建物の構造被害程度別に、屋根瓦の脱落程度の各割合を提案値として示す。

3.2 構造被害程度が「外観上の被害なし」の場合

構造被害の小さい地区、大きい地区それぞれの結果(表1, 2, 図4.2, 5.2)を見ると、屋根瓦が「被害半分以下」のものは27.0%, 41.3%, 「被害半分以上全部未済」のものは6.9%, 8.8%, 「被害全部」のものは1.4%, 1.3%となり、若干の違いはあるが、両者に大差は見られない。全地区の結果(表3, 図6.2)としては、屋根瓦脱落状況が「被害半分以下」が29.3%、「被害半分以上全部未済」が7.2%、「被害全部」が1.4%となる。

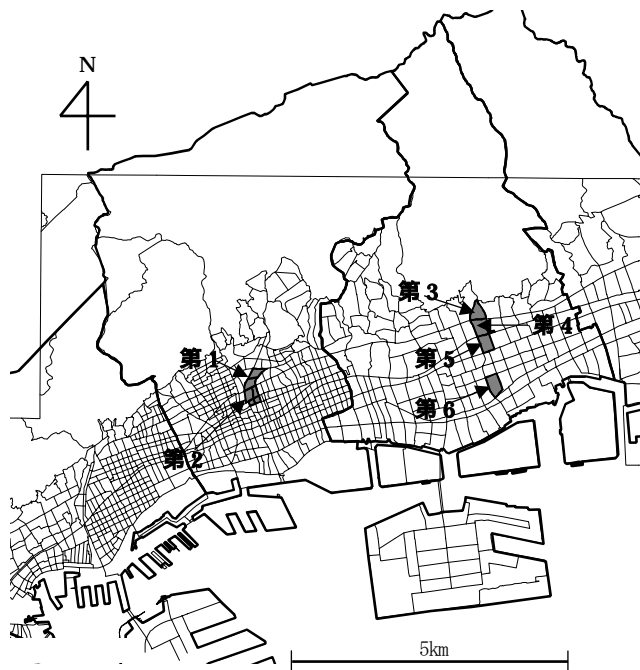


図2 調査対象地区

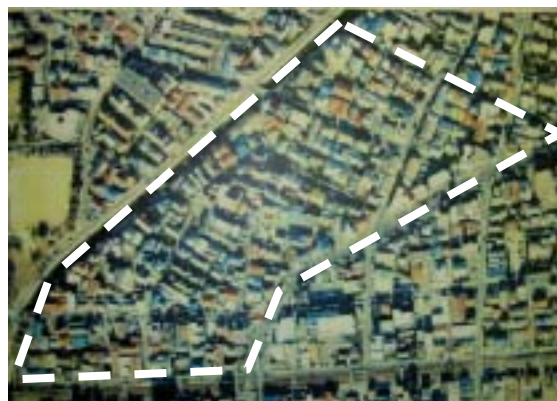


写真1 航空写真の一部
(白破線枠内は第1地区)



写真2 航空写真の一部
(白破線枠内は第2地区)

3.3 構造被害程度が「軽微な損傷」の場合

構造被害の小さい地区、大きい地区それぞれの結果(表1, 2、図4.2, 5.2)を観ると、屋根瓦が「被害半分以下」のものは、36.2%、43.1%、「被害半分以上全部未満」のものは、16.9%、19.9%、「被害全部」のものは、13.1%、9.9%となり、若干の違いはあるが、両者に大差は見られない。全地区の結果(表3、図6.2)としては、屋根瓦脱落状況が「被害半分以下」が40.2%、「被害半分以上全部未満」が18.6%、「被害全部」が11.3%となる。

表1 構造被害の小さい地区(第1, 3, 4)の分析結果

屋根瓦脱落状況	建物の構造被害程度			
	外観上の被害なし	軽微な損傷	中程度の損傷	全壊または大破
被害なし	273棟(64.7%)	40棟(30.8%)	7棟(16.7%)	4棟(14.8%)
被害半分以下	114(27.0)	47(36.2)	12(28.6)	10(37.0)
被害半分以上全部未満	29(6.9)	22(16.9)	14(33.3)	7(25.9)
被害全部	6(1.4)	17(13.1)	7(16.7)	4(14.8)
屋根崩壊	0(0)	1(0.8)	2(4.8)	2(7.4)
ブルーシート	0(0)	3(2.3)	0(0)	0(0)
合計	422(100)	130(100)	42(100)	27(100)

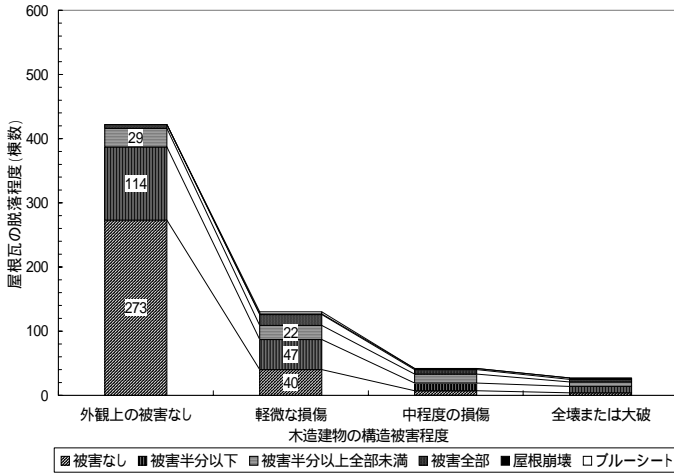


図4.1 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(棟数)
(構造被害の小さい地区(第1, 3, 4)について)

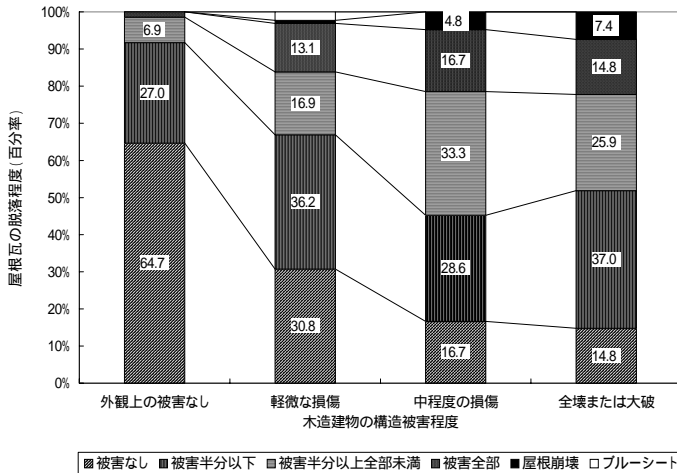


図4.2 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(百分率)
(構造被害の大きい地区(第2, 5, 6)について)

3.4 構造被害程度が「中程度の損傷」の場合

構造被害の小さい地区、大きい地区それぞれの結果(表1, 2、図4.2, 5.2)を見ると、屋根瓦が「被害半分以下」のものは28.6%、52.1%、「被害半分以上全部未満」のものは33.3%、22.9%、「被害全部」のものは16.7%、16%となり、若干の違いはあるが、両者に大差は見られない。全地区の結果(表3、図6.2)としては、屋根瓦脱落状況が「被害半分以下」が47.3%、「被害半分以上全部未満」が24.8%、「被害全部」が16.1%となる。

表2 構造被害の小さい地区(第2, 5, 6)の分析結果

屋根瓦脱落状況	建物の構造被害程度			
	外観上の被害なし	軽微な損傷	中程度の損傷	全壊または大破
被害なし	39棟(48.8%)	45棟(24.9%)	12棟(6.4%)	29棟(8.1%)
被害半分以下	33(41.3)	78(43.1)	98(52.1)	96(27.0)
被害半分以上全部未満	7(8.8)	36(19.9)	43(22.9)	92(25.8)
被害全部	1(1.3)	18(9.9)	30(16.0)	71(19.9)
屋根崩壊	0(0)	4(2.2)	5(2.7)	68(19.1)
ブルーシート	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
合計	80(100)	181(100)	188(100)	356(100)

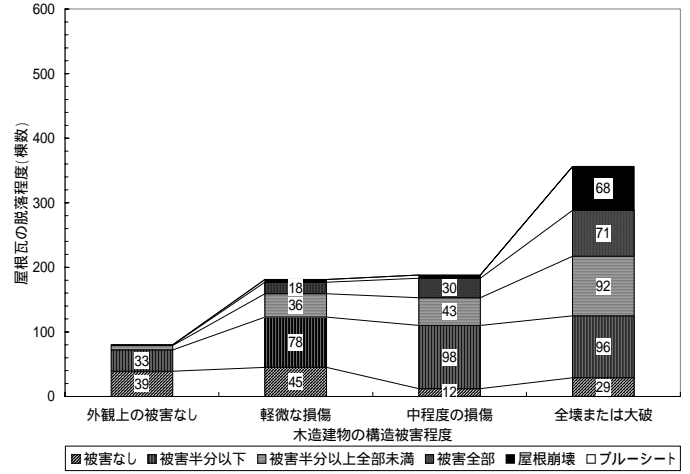


図5.1 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(棟数)
(構造被害の大きい地区(第2, 5, 6)について)

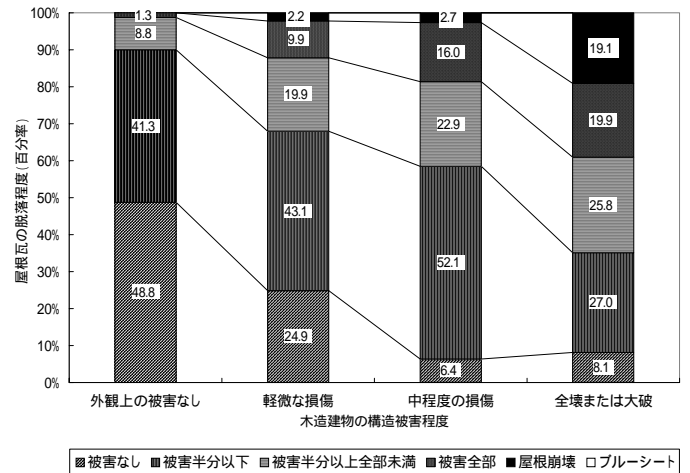


図5.2 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(百分率)
(構造被害の大きい地区(第2, 5, 6)について)

4.まとめ

(1) 阪神淡路大震災後の屋根瓦の脱落状況を航空写真を用いて1棟ごとに判断し、震災後に現地で実施した構造被害調査の結果と1棟ごとに対応させ、木造建物の構造被害程度別に、屋根瓦脱落程度の割合を明らかにした。

(2) 各都道府県ごとに行われている、地震による建築物の構造被害想定手法により、木造建物の構造被害棟数が既知となれば、本研究の提案割合を用いて、何らかの屋根瓦脱落被害を受け、火の粉による跳躍延焼の潜在的危険性を有する木造建物棟数が明らかになる。

(3) 本研究成果は、火の粉による跳躍延焼シミュレーションモデルの初期条件として、屋根瓦の脱落程度の設定に活用していく予定である。

表3 全体(第1~6地区)の分析結果

屋根瓦脱落状況	建物の構造被害程度			
	外観上の被害なし	軽微な損傷	中程度の損傷	全壊または大破
被害なし	312棟(62.2%)	85棟(27.3%)	19棟(8.3%)	33棟(8.6%)
被害半分以下	147(29.3)	125(40.2)	110(47.8)	106(27.7)
被害半分以上全部未済	36(7.2)	58(18.6)	57(24.8)	99(25.8)
被害全部	7(1.4)	35(11.3)	37(16.1)	75(19.6)
屋根崩壊	0(0)	5(1.6)	7(3.0)	70(18.3)
ブルーシート	0(0)	3(1.0)	0(0)	0(0)
合計	502(100)	311(100)	230(100)	383(100)

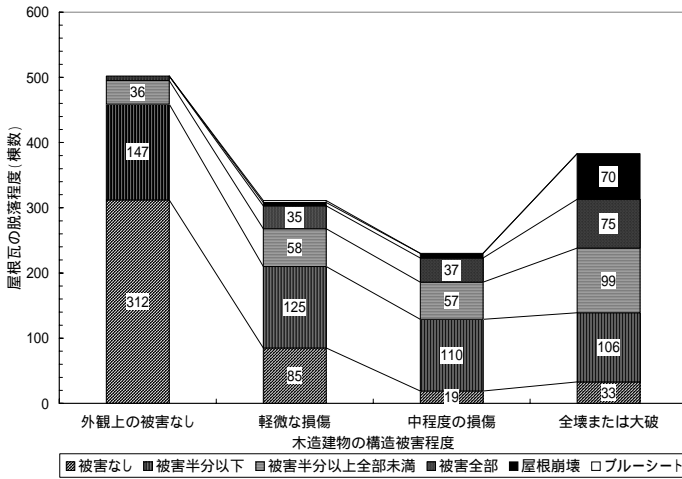


図6.1 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(棟数)
(全地区(第1~6)について)

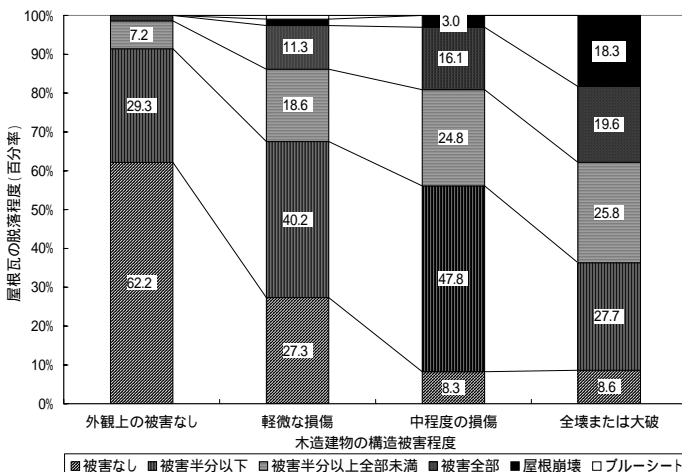


図6.2 構造被害程度別の屋根瓦の脱落程度(百分率)
(全地区(第1~6)について)

注 1) 現地調査の際の区分は、「外見上の被害なし」、「軽微な損傷」、「中程度の損傷」、「全壊または大破」の4段階である。居住可能性により区分しており、具体的には、「外見上の被害なし」は見た目には被害がない状況、「軽微な損傷」は修理を加えると住める状況、「中程度の損傷」は大幅な修理で住める可能性がある状況、「全壊または大破」は住める見込みが非常に少ない状況である。 2) 構造区分は、木造(純木造または防火木造)、鉄筋コンクリート造、鉄骨造である。また、構造被害程度区分は、一部損壊、半壊、全壊であり、本研究で引用した区分と同じである。

参考文献 1) 建設省(当時)建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告(速報)、1995年2月 2) 震災復興都市づくり特別委員会：阪神・淡路大震災被害実態緊急調査 被害度別建物分布状況図集、1995年3月 3) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告、1997年8月

屋根に落下した火の粉の着火性状に関する実規模火災風洞実験

1. はじめに

大規模地震に伴う同時多発火災は市街地火災に進展し得る。市街地火災は、特に強風下では、拡大の勢いを増すが、大量に発生する火の粉による飛び火がその一因となっている。飛び火被害箇所を調べてみると、屋根が弱点になることが圧倒的に多い。これは、大規模な地震直後には、屋根瓦が脱落し、屋根を構成する木材が露出するためと考えられる。そこで本研究では、瓦が脱落した状態の屋根の飛び火被害を明らかにするため、火災風洞実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験 case と実験条件を表1に記した。

屋根試験体は、一般的な木造瓦葺屋根を825×1717mmの大きさに切り出したもので、垂木、野地板(厚さ12mm合板)、アスファルトルーフィング、瓦葺、瓦より成る。ただし、

case1~3 では、地震の揺れにより屋根瓦が全部脱落した状態を想定して瓦は葺かない(写真2)。case4については、軽微な損傷を想定して、火種設置部に当たる一枚だけ剥がした状態とした(写真3)。これらの試験体は傾斜角 30 度の架台上に設置した(写真2,3)。

ぶな材(密度 560kg/m³)を 19×19×80mm に成形したものを、1段に3本ずつ等間隔に並び、交互に直交するように3段に積み重ねて、釘で固定したもの(外寸は 80×80×60mm、質量は 155g、写真1)を、バーナー上面から 65mm の位置で、80×80mm の2面に対して、各1分間ずつ合計2分間火炎を当て(注1、写真6)、着火したものを、火種として、試験体上面に設置した。設置箇所を図2に示す。

表1 実験条件

実験 case	風速	瓦の有無
case1	0m/s	無
case2	3m/s	無
case3	6m/s	無
case4	6m/s	有 (1枚脱落)



写真1 火種用クリブ

落下火の粉の燃焼性状は、風速の影響を大きく受けるため、瓦の損傷程度と同様に、風速も実験パラメータとする必要がある。火種設置予定箇所(図1中の○)で、無風、3m/s、6m/s の3段階の風速を設定した(表1)。はじめに、火種設置予定箇所(図1中の○)での風速と6m風上(図1中の×)での風速の相関を調べ(表2)、実験中は、表1中の設定風速が得られるように、6m風上(図1中の×)での風速を制御した。なお、風速の相関を調べる際には、架台は取り除いている。

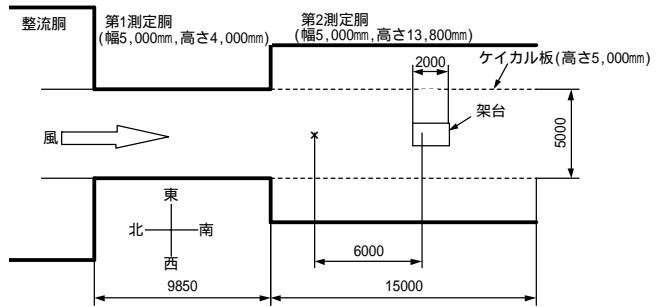


図1 火災風洞内配置図 (単位: mm)

表2 風速の相関

目標風速	火の粉設置箇所の風速	6m風上の風速
3m/s	2.99m/s	3.41m/s
6m/s	5.98m/s	6.64m/s

2.2 測定項目

デジタルビデオカメラを試験体風上側(図1中①)と試験体真横(図1中②)に、小型 CCD カメラを試験体裏面(図1中③)に設置して、火種、試験体の燃焼状況を撮影した。

熱電対を試験体表面(アスファルトルーフィングの上)に18箇所(図2)、裏面(野地板の裏)に18箇所(図3)、計36箇所を設置して、実験中の温度変化を計測した。



写真2 試験体(case1~3)



写真3 試験体(case4)



写真4 試験体裏面



写真5 試験体側面(case4)



写真6 火種の着火



写真7 設置された火種

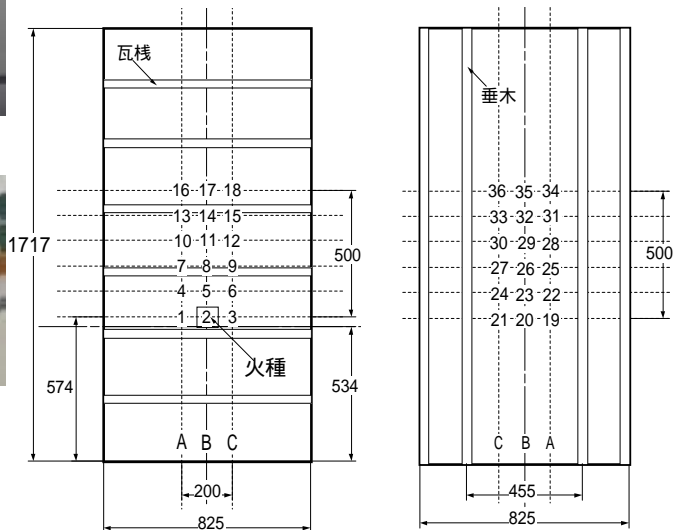


図2 試験体表面(単位: mm)

図3 裏面(単位: mm)

3. 実験結果

3.1 実験の進展状況

各 case の進展状況を表 3～6 に示す。なお、火種をバーナーであぶり始めた時刻を実験開始時刻とした。従って、火種を試験体に設置した時、バーナーから設置箇所への移動も含めて、実験開始から 2 分以上経過していることになる。

3.2 試験体の焼損状況

各 case について、アスファルトルーフィング表面が熔融、燃焼等で黒く変色している範囲の縦、横方向の最大長さ、並びに、野地板が燃え抜けた範囲の縦、横方向の最大長さを測り、表 7 に示した。実験後の試験体表面の状況を写真 10(case1), 11(case2) に示した。

表 3 case1 の進展状況

時間	進展状況
00 分 00 秒	木材クリブの片面を炙る
01 分 00 秒	木材クリブの逆の面を炙る
02 分 00 秒	木材クリブの加熱を終了し試験体上面に設置する 火種は設置した時点から着火している
15 分 00 秒	既に火種の炎が消滅（試験体は燃え抜けない）

表 4 case2 の進展状況

時間	進展状況
00 分 00 秒	木材クリブの片面を炙る
01 分 00 秒	木材クリブの逆の面を炙る
02 分 00 秒	木材クリブの加熱を終了し試験体上面に設置する 火種は設置した時点から着火している
14 分 00 秒	試験体裏面から煙が発生
29 分 18 秒	火種設置箇所を試験体が燃え抜ける
41 分 44 秒	火種、試験体の燃焼が止まる
42 分 58 秒	煙の発生も止まる



写真 10 試験体表面の焼損 (case1)



写真 11 試験体表面の焼損 (case2)

表 5 case3 の進展状況

時間	進展状況
00 分 00 秒	木材クリブの片面を炙る
01 分 00 秒	木材クリブの逆の面を炙る
02 分 00 秒	木材クリブの加熱を終了し試験体上面に設置する 風速が大きいので、火種はくすぶった状態でまだ着火はしていない
04 分 48 秒	火種が着火する
06 分 20 秒	既に試験体裏面より煙が発生
14 分 24 秒	火種設置箇所を試験体が燃え抜ける
17 分 20 秒	火種、試験体の燃焼が止まる

表 6 case4 の進展状況

時間	進展状況
00 分 00 秒	木材クリブの片面を炙る
01 分 00 秒	木材クリブの逆の面を炙る
02 分 00 秒	木材クリブの加熱を終了し試験体上面に設置する 火種は設置した時点から着火している
11 分 49 秒	試験体裏面から煙が発生する
17 分 12 秒	火種設置箇所を試験体が燃え抜ける
18 分 07 秒	試験体裏面から炎が噴出する
39 分 50 秒	煙の発生が止まる

表 7 試験体の焼損状況

実験 case	表面焼損範囲		燃え抜け範囲	
	縦方向	横方向	縦方向	横方向
case1	19	21	-	-
case2	34	42	4	5
case3	38	42	8	11
case4	22	52	8	9

3.3 温度分布に関して

表面と裏面の温度分布を図 4～19 に示す。また、表面最高温度分布を図 20～23 に示す。

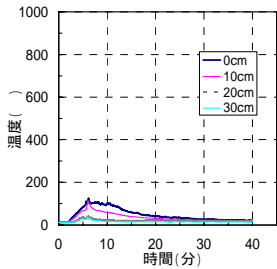


图4 表面A轴温度(case1)

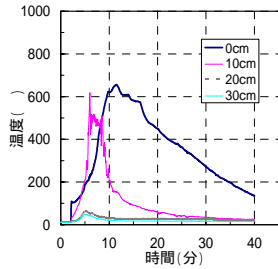


图5 表面B轴温度(case1)

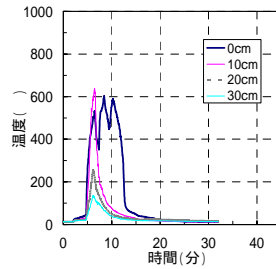


图12 表面A轴温度(case3)

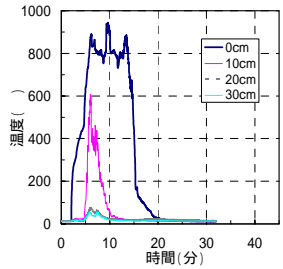


图13 表面B轴温度(case3)

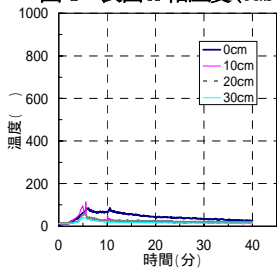


图4 表面C轴温度(case1)

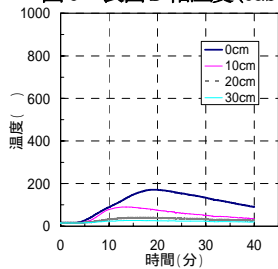


图7 裏面B轴温度(case1)

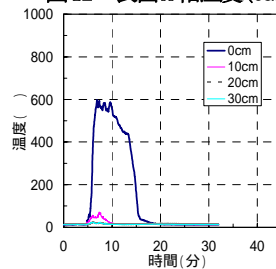


图14 表面C轴温度(case3)

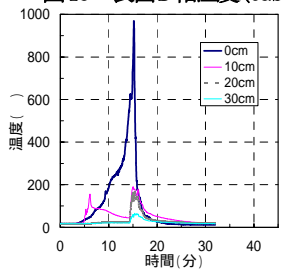


图15 裏面B轴温度(case3)

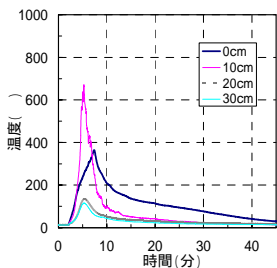


图8 表面A轴温度(case2)

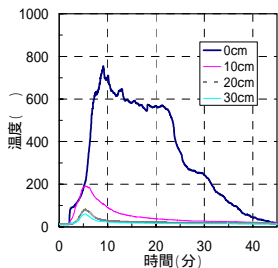


图9 表面B轴温度(case2)

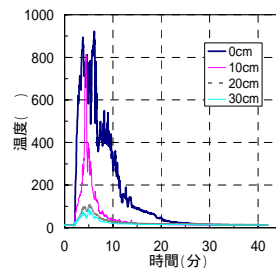


图16 表面A轴温度(case4)

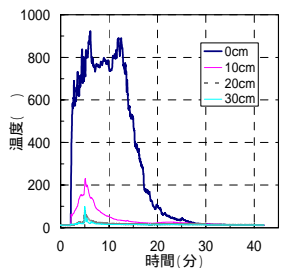


图17 表面B轴温度(case4)

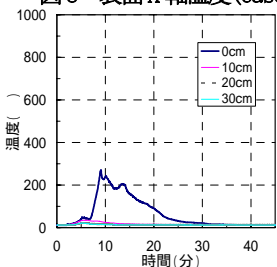


图10 表面C轴温度(case2)

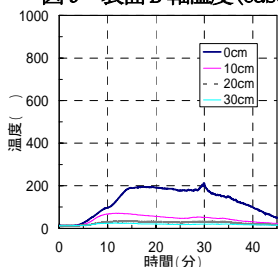


图11 裏面B轴温度(case2)

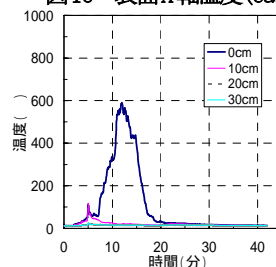


图18 表面C轴温度(case4)

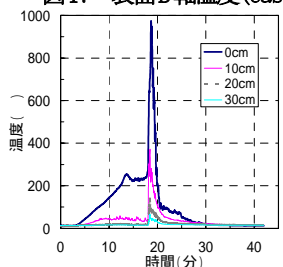


图19 裏面B轴温度(case4)

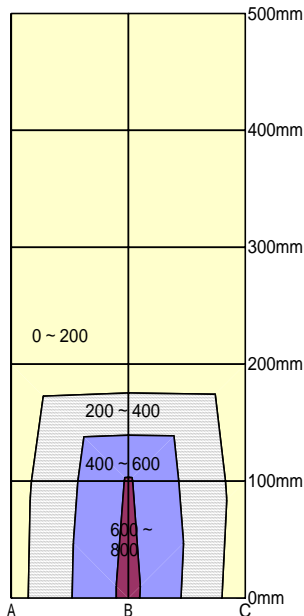


图20 表面最高温度分布(case1)

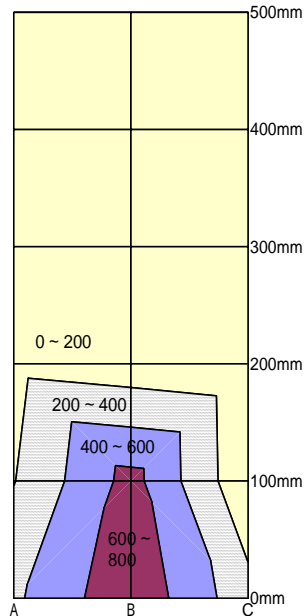


图21 表面最高温度分布(case2)

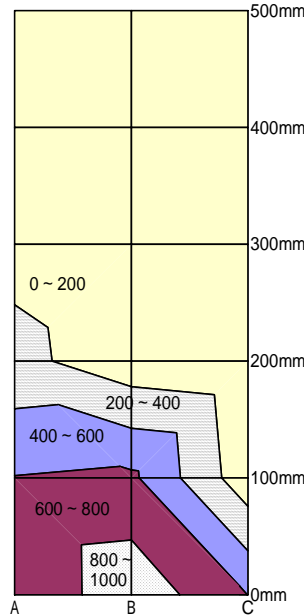


图22 表面最高温度分布(case3)

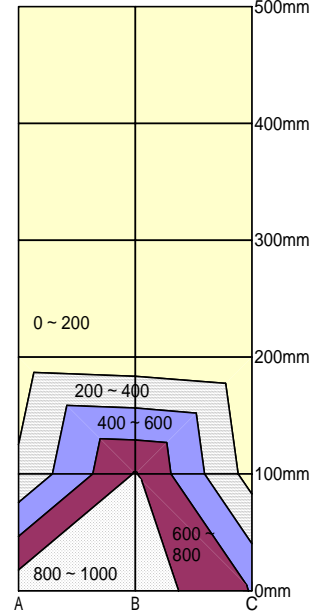


图23 表面最高温度分布(case4)

4. 考察

(1) 風速と燃焼性状の関係

今回の実験では、野地板としては比較的薄い12mm厚さの合板を用いているが、case1の無風条件では燃え抜けが認められず、case2~4の有風条件下では火種の直下に燃え抜けを生じた(表7)。燃え抜け時間は、case2(風速3m/s)の約29分に対し、case3(風速6m/s)は約14分に半減している。また、case3は、燃え抜け時間が短縮されるだけでなく、燃え抜け範囲も広がっている(表7)。これらのことから、風速が6m/s程度までの範囲では、風速によって火の粉の加害性が大きく変化すると考えられ、風速が大きいほど危険性が大きくなるものと言える^{注2)}。ただし、いずれの条件においても、屋根自体の燃焼は火源である火種近傍の限られた範囲であり、火種の燃焼が終了すると屋根の燃焼も収まっている。このため、火の粉の飛来による火災拡大の危険性としては、屋根自体への延焼というよりは、むしろ、火種直下で野地板が燃え抜けて、小屋裏や屋内の可燃物に延焼することが考えられる。

(2) 燃焼性状と表面温度の関係

火種近傍の表面温度を比較すると(図5, 9, 13)、3m/s下では、無風下に比べて燃焼時間がやや短くなり、最高温度は、無風下の600°C程度に対して、700°C程度に上昇する(図5, 9)。さらに、6m/s下では、燃焼時間が20分に半減し、最高温度も900°C程度に達する(図13)。それに伴い、温度の上昇、下降も急激になる。

各部で測定された最高温度の分布を見ると(図20~23)、風速が大きいほど火種近傍の温度が上昇している様子が見られる。

これらを上述の野地板の燃焼性状と考え合わせると、長時間の緩やかな加熱より、短時間であっても、有風下で急激な加熱を受ける条件の方が、火災拡大の危険性をより含んでいるものと推察される。

(3) 瓦の欠損と燃焼性状の関係

case3とcase4はいずれも風速6m/sの条件であるが、瓦が全面欠損のcase3は試験開始後約14分に、一部脱落のcase4は試験開始後約17分に燃え抜けを生じている。また、case3は、燃え抜け時間が若干早だけでなく、燃え抜け範囲も若干広がっている(表7)。最高温度分布を比較すると(図22, 23)、200°C以上の範囲の面積はcase3の方が大きい、800°C以上の範囲では、case4の方が大きい。case4は瓦が一枚だけの欠損であり、その欠損部に設置された火種は周囲を瓦に取り囲まれる形になる。このため、

欠損部に吹き込む気流の状況などから、火熱の影響が瓦の欠損部に集中したものと考えられる。

5. まとめ

瓦葺屋根では瓦が不燃材料であることから、健全な状態においては火の粉が飛来しても大きな危険が生じるとは考えにくい。しかしながら、瓦が全面欠損や一部欠損した箇所に火の粉が飛来すると、瓦の損傷程度にかかわらず、野地板に燃え抜けを生じる危険性が高い。野地板に燃え抜けが生じるかどうかは風速に依存し、6m/s程度までは風速が大きいほど焼損も拡大する。

6. 今後の課題

今回は、建築基準法の屋根試験で採用されている比較的大きな火種を採用した。実際の飛び火現象では、様々な大きさの火の粉が発生、飛来することが考えられる。今後は、火の粉の大きさ、風速、瓦の損傷程度に関して、今回の条件以外の設定も行って、実験を継続する予定である。また、野地板が燃え抜けた後、家屋炎上に至るプロセスについても明らかにする。

注 1)バーナー上面から65mmの位置の火炎温度は800±100°Cであった。2)火の粉の着火条件に関する守屋忠雄の実験では、風速が3~4m/sを境に、着火率が低下することが報告されている。ただし、これ以上の情報は明らかになっておらず、現在、文献の入手に努めている。

火の粉飛散範囲の数値シミュレーション

1. はじめに

火の粉による跳躍延焼は、市街地火災における延焼要因の一つでありながら、未解明な部分が多く残されている。その解明に当たっては、火の粉の飛散範囲を予測することが重要となる。予測手法としては、CFD(Computational Fluid Dynamics、数値流体力学)を用いた数値シミュレーションが最も有効と考えられ、いくつか^{文1)~5)}の研究成果も示されている。

本稿で示す数値シミュレーションは、NIST(National Institute of Standards and Technology、米国商務省標準技術研究所)のBFRL(Building and Fire Research Laboratory、建築火災研究所)で開発されたFDS(Fire Dynamics Simulator)^{文6)~8)}をベースに、改良を加えたものである。火災による急激な温度変化、密度変化に対応するほか、飛散粒子に作用する抗力、揚力などの外力が考慮されている。なお、FDSは、Fortran90で記述されたソースプログラムも含めて、フリーソフトウェアとして公開されて

いる。

2. FDS の概要

FDS の流体力学モデルでは、低マッハ数の問題に適した Navier-Stokes 方程式の近似形を用いる。この近似は、温度と密度の大きな変化を許しつつ、音波をフィルタリングして取り除く。この近似により、方程式は低速の熱対流過程と整合的な楕円型となる。計算は、DNS (Direct Numerical Simulation、直接数値シミュレーション)、または、LES (Large Eddy Simulation)、いずれの方法でも取り扱えるようになっている。DNS では拡散項は直接計算される。これに対し、LES では、大スケール渦は直接計算されるが、サブグリッドスケールの散逸過程はモデル化される。

FDS には可視化ソフトウェア Smokeview が付属しており、FDS の計算結果ファイルを読み込んで火災のプロセスをアニメーション表示することができる。たとえば、FDS にはスプリンクラーのモデルが含まれており、スプリンクラーからの液滴粒子の運動を Smokeview で可視化できるようになっている。本稿では、火の粉粒子の飛散状況を表示するために Smokeview を利用した。ただし、火の粉運動のシミュレーションを行うときには、スプリンクラー・モデルは使用しないこととし、火の粉の座標を粒子ファイルとして書き出すことにより火の粉の運動を可視化できるようにした。

3. 火の粉飛散時の運動の数理モデル

火の粉は気流による流体力を受けて運動するが、この運動の気流への影響は小さいものとする。この仮定により、FDS の流体力学モデルには何ら手を加えることなく火の粉の運動を取り扱うことができる。

シミュレーションを単純化するために、火の粉粒子の形状は燃焼に伴って相似形で寸法が変化する剛体であると仮定して、気流による抗力、揚力、モーメントを受けた剛体の 3 次元の自由運動を考える^{文9)}。運動方程式は重心の速度を依存変数とする並進運動方程式と、重心回りの回転角速度を依存変数とする回転運動方程式よりなる。

3.1 基本式

火の粉の並進運動の方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{u}_p) = m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} + \mathbf{u}_p \frac{dm_p}{dt} = \mathbf{F}_{dr} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_l \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (2)$$

ここで、添え字 p は火の粉粒子を表すものとする。 \mathbf{F}_{dr} は

流体の抗力、 \mathbf{F}_g は重力、 \mathbf{F}_l は揚力である。火の粉の質量 m_p は燃焼が進むに従って変化するものとし、その履歴は時間の関数として、実験で得られた既知の値を用いる。 \mathbf{u}_p は火の粉の速度ベクトル、 \mathbf{r}_p は火の粉の重心の位置ベクトルである。

重心まわりの回転運動方程式は、物体の慣性主軸を座標軸とする物体座標系 (座標成分を 1, 2, 3 の数字で表すこととする) では、次式で与えられる。

$$I_1 \frac{d\Omega_1}{dt} + \Omega_1 \frac{dI_1}{dt} + (I_3 - I_2)\Omega_2\Omega_3 = K_1 \quad (3)$$

$$I_2 \frac{d\Omega_2}{dt} + \Omega_2 \frac{dI_2}{dt} + (I_1 - I_3)\Omega_3\Omega_1 = K_2 \quad (4)$$

$$I_3 \frac{d\Omega_3}{dt} + \Omega_3 \frac{dI_3}{dt} + (I_2 - I_1)\Omega_1\Omega_2 = K_3 \quad (5)$$

主慣性モーメント I_1, I_2, I_3 は時間変動するものとし、その履歴は既知であるとする。一般に、回転軸 A のまわりの慣性モーメント I_A は、回転軸からの距離 r 、質量 m 、体積 V とすると、次式で与えられる。

$$I_A = \int r^2 dm = \int r^2 \rho_p dV \quad (6)$$

$(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$ は物体座標系での角速度ベクトル、

(K_1, K_2, K_3) は剛体に加わる力のモーメントである。

物体の向きを表すために、(7)~(10)式に示すパラメータ $(q_k, k = 0 \dots 3)$ を用いる^{文10)}。式中の ϕ, θ, ψ は Euler 角である。

$$q_0 = \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\phi + \psi}{2} \quad (7)$$

$$q_1 = \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\phi - \psi}{2} \quad (8)$$

$$q_2 = \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\phi - \psi}{2} \quad (9)$$

$$q_3 = \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\phi + \psi}{2} \quad (10)$$

このパラメータには以下の条件が付随し、これによって

物体回転の自由度3が確保される。

$$\sum_{k=0}^3 q_k = 1 \quad (11)$$

q_k の変化率と角速度の間には次の関係がある。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ベクトルを全体座標系から物体座標系の表示に変換する回転行列 A は次で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

物体の向きを Euler 角で表した場合、これを角速度から求める際に特異性が表れて計算が困難になる。ただし、パラメータ q_k を使用すると、このような特異性が表れない。

流体抗力は次のように表される^{文11)}。

$$\mathbf{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho_r A_p |\mathbf{u}_r| \mathbf{u}_r \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{u}_r = \mathbf{u} - \mathbf{u}_p$ は流体速度 \mathbf{u} の火の粉に対する相対速度である。また、 $\rho_r = \rho_p - \rho$ で、 ρ は空気の密度、 ρ_p は火の粉の密度である。この式からもわかるように、抗力は流体の相対速度の方向に働く。 C_d は抗力係数で、一般にレイノルズ数 ((15)式) や物体の方向などの関数として記述される。

$$\text{Re}_p = \frac{\rho |\mathbf{u}_p| l_p}{\mu} \quad (15)$$

ここで、 l_p は粒子の代表長さ、 μ は流体の粘性係数である。

火の粉に加わる力から、抗力と重力を除いた残りの力を揚力と考える。従って、ここで言う揚力は、物体に加わる

重力以外の力のうち、相対速度に垂直な成分である。揚力

の方向を \mathbf{n}_l とすると、揚力は次のように表される^{文11)}。

$$\mathbf{F}_l = C_l \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}_r|^2 \mathbf{n}_l \quad (16)$$

ここで、 C_l は抗力係数で、Reynolds 数や相対速度に対する物体の向きなどの関数である。

流体による力のモーメントは次の表現を用いる^{文11)}。

$$\mathbf{K}_m = \frac{1}{2} C_m A_p l_p \rho |\mathbf{u}_r|^2 \mathbf{n}_m \quad (17)$$

ここで、 C_m はモーメント係数、 \mathbf{n}_m はモーメントの方向ベクトルである。

3.2 火の粉の形状モデル

一般的な火の粉の形状を取り扱うためには、多様な火の粉の形状とその内部の密度分布、および燃焼に伴う形状の変化を与えなければならない。それに応じて体積、投影面積、代表長さ、慣性モーメントなどを更新する必要がある。これは計算上は現実的ではない。ここでは、実用的な範囲で実際に解析できることを目的として、単純な形状を仮定してその運動を調べることとする。実際に取り扱う形状の種類としては、①球、②円筒、③直方体、を考える。円筒の軸を短く取れば、円盤形状として扱うことができる。また、直方体の1辺を短くすると矩形板となる。

球の体積 V_p と平面への投影面積 A_p は、半径を r とすると、次のようになる。

$$V_p = \frac{4\pi}{3} r^3 \quad (18)$$

$$A_p = \pi r^2 \quad (19)$$

主慣性モーメントは各軸共通で次式となる。

$$I_1 = I_2 = I_3 = \rho_p \frac{8\pi r^5}{15} = m_p \frac{r^2}{2} \quad (20)$$

代表長さ $l_p = 2r$ である。

円筒の体積、投影面積、代表長さは、半径を r 、軸の長さを h とすると、次のようになる。

$$V_p = \pi r^2 h \quad (21)$$

$$A_p = 2rh \sin \alpha + \pi r^2 \cos \alpha \quad (22)$$

$$l_p = \max(h, 2r) \quad (23)$$

ここで、 α は円筒の軸の方向と相対速度方向の間の角度である。主慣性モーメントは円筒の軸を物体座標系の1軸に一致させた場合、次のようになる。

$$I_1 = \rho_p \frac{\pi r^4 h}{2} = m_p \frac{r^2}{2} \quad (24)$$

$$I_2 = I_3 = \rho_p \frac{\pi r^2 h}{12} (3r^2 + h^2) = m_p \frac{3r^2 + h^2}{12} \quad (25)$$

直方体の体積、投影面積、代表長さは、物体座標系の1, 2, 3軸方向の長さを a, b, c としたとき、次で与えられる。

$$V_p = abc \quad (26)$$

$$A_p = bc|\hat{\mathbf{n}}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}_r| + ca|\hat{\mathbf{n}}_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}_r| + ab|\hat{\mathbf{n}}_3 \cdot \hat{\mathbf{u}}_r| \quad (27)$$

$$l_p = \max(a, b, c) \quad (28)$$

主慣性モーメントは以下となる。

$$I_1 = \rho_p \frac{abc}{12} (b^2 + c^2) = m_p \frac{b^2 + c^2}{12} \quad (29)$$

$$I_2 = m_p \frac{c^2 + a^2}{12} \quad (30)$$

$$I_3 = m_p \frac{a^2 + b^2}{12} \quad (31)$$

火の粉が運動を始めてからの寸法変化は、モデルを単純化する目的で相似形を保ったまま初期形状に対して長さの比率が変化することとして、この初期に対する長さの倍数を時間の関数として与えるようにした。

3.3 抗力、揚力、モーメント

抗力や揚力、力のモーメントを決める要因は多様であるが、その大きさは Reynolds 数と物体から見た気流の相対速度の方向に依存し、さらに角速度や気流の変動などにも依存すると考えられる。しかし、こういった依存関係に関しては十分なデータがあるとは言い難い。本稿では、取り扱いの簡便性も考えて、単純化を行った。

抗力は、Reynolds 数に依存する関数と、相対速度と物体座標系の1軸の間の角度の関数の積とした。抗力の方向は物体に対する気流の相対速度の方向である。

揚力は、物体に働く流体力の抗力に垂直な成分とし、揚

力係数を物体座標系1軸に対する相対速度の方向のみの関数とした。Reynolds 数に対する依存性は取り入れていないが、拡張は容易である。揚力の方向は相対速度に垂直で、1軸から見て相対速度のある側に働くものとした。

物体に働く力のモーメント係数も、揚力同様、角度依存のみを考える。モーメントの方向は、相対速度と1軸を含む平面に垂直で、正のモーメント係数に対し、1軸と相対速度の間の角度が減少する方向に働くものとした。

4. 数値解法

火の粉の運動の基本式の(1)、(2)、(3)~(5)式、(12)式は、12の主要依存変数に対する1階の連立常微分方程式である。常微分方程式の解法には様々な種類があるが、ここでは、最も基本的な4次のRunge-Kutta法を使用することとする。この方法は、条件付き安定であるが、モデルを変更することも十分考えられ、そのような場合での柔軟性から採用した。不安定性については流体計算での時間刻みを細分することで対応する。

一般的に1階の連立常微分方程式は次式で表される。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{v}, t) \quad (32)$$

ここで、 \mathbf{v} は従属変数を並べたベクトルで、 \mathbf{f} は同じ次元のベクトル値関数である。この常微分方程式に対するRunge-Kutta法は以下のように表される。時間を離散化し、時間ステップをインデックス n で表すこととする。時間ステップ n における値 (添え字 n で表す) がわかっているときに、 $n+1$ ステップの値を以下の式で計算する。

$$\mathbf{k}_1 = h \mathbf{f}(\mathbf{v}_n, t_n) \quad (33)$$

$$h = t_{n+1} - t_n \quad (34)$$

$$\mathbf{k}_2 = h \mathbf{f}(\mathbf{v}_n + \mathbf{k}_1/2, t_{n+1/2}) \quad (35)$$

$$\mathbf{k}_3 = h \mathbf{f}(\mathbf{v}_n + \mathbf{k}_2/2, t_{n+1/2}) \quad (36)$$

$$\mathbf{k}_4 = h \mathbf{f}(\mathbf{v}_n + \mathbf{k}_3, t_{n+1}) \quad (37)$$

$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \frac{1}{6}(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \quad (38)$$

この解法で問題に依存する部分は関数計算だけであり、方程式を変更するときもこの関数計算を変更すればよい。

5.まとめ

火の粉の飛散時の運動を検討するために、火災現象のシミュレーションソフトウェアに火の粉運動の物理モデルを組み込んだ。

火の粉は気流による抗力や揚力、モーメントを受けて飛散運動する。この運動は、位置、速度、回転角、角速度を用いて、並進運動の運動方程式と回転運動方程式により記述される。

火の粉の形状としては、球形、円筒形、直方体を想定し、燃焼による形状変化を簡易的に模擬するために相似形で寸法変化が起こるものとした。

火の粉に働く抗力、揚力、重力、流体力のモーメントについて、簡易であるが、各種の形状に対応できるよう、柔軟なモデルを作成した。

参考文献 1)林吉彦、大宮喜文、岩見達也、佐賀武司、後藤伸寿、加藤信介、大岡龍三、吉岡英樹、野口貴文：火の粉の飛散範囲に関する数値シミュレーション(その1) 数値解析手法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 131-132、2003 2)林吉彦、大宮喜文、岩見達也、佐賀武司、後藤伸寿、加藤信介、大岡龍三、吉岡英樹、野口貴文：火の粉の飛散範囲に関する数値シミュレーション(その2) 計算結果と実地調査結果の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 133-134、2003 3)黄弘、大岡龍三、加藤信介、林吉彦、大竹宏：市街地火災における燃焼モデリングと火の粉の飛散性状の数値解析(その1) 火災気流モデルと

燃焼モデリング、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 127-128、2003 4)大竹宏、黄弘、大岡龍三、加藤信介、林吉彦：市街地火災における燃焼モデリングと火の粉の飛散性状の数値解析(その2) 火の粉の飛散性状の数値解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 129-131、2003 5)樋本圭佑、田中、丸山敬：都市火災時における火の粉の飛散に関する基礎的研究、LESによる正方形平板の飛散性状解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 125-126、2003 6)Kevin B. McGrattan, et. al. : Fire Dynamics Simulator (Version 3) - Technical Reference Guide, NISTIR 6783, 2002 Ed., 2002 7)Kevin B. McGrattan, et. al. : Fire Dynamics Simulator (Version 3) - User's Guide, NISTIR 6784, 2002 Ed., 2002 8)Glenn P. ForneyKevin B. McGrattan : User's Guide for Smokeview Version 3.1- A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NISTIR 6980, 2003 9)Herbert Goldstein : Classical Mechanics, pp.143-184, 1950 10)D. Evans and S. Murad:Singularity free algorithm for molecular dynamics simulation of rigid polyatomics, Mol. Phys, 34:2, P. 327, 1977 11)日本機械学会編：機械工学便覧 A5 流体力学、丸善、pp. 97-106, 1986

謝辞

I～Vの研究の一部は、平成14～15年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B))、研究代表者：林吉彦、課題番号：14350332)の助成を受けた。

共同研究者リスト

研究者名 (所属)	I等	II等	III等	IV等	V等	延焼予測モデル	火災旋風
吉岡英樹 (東京大学)	○	○	○	○		○	
大宮喜文 (東京理科大学)	○		○	○	○	○	○
菅原進一 (東京理科大学)	○						
野口貴文 (東京大学)	○	○	○	○		○	
加藤信介 (東京大学)	○				○		
大岡龍三 (東京大学)	○				○		
若松孝旺 (東京理科大学)	○						○
田中透一 (東京理科大学)	○						○
佐賀武司 (東北工業大学)	○				○		
石原慶大 (ヤマトプロテック)	○						
増田秀昭 (建築研究所)	○						
五頭辰紀 (建築研究所)	○						
川合孝明 (建築研究所)	○						
飯田良夫 (ベターリビング)		○					
中村賢一 (ベターリビング)		○					
佐藤英人 (東京理科大学)	○		○	○			
林 丈晴 (東京理科大学)	○		○	○			
岩見達也 (国土技術政策総合研究所)			○		○	○	
西本俊郎 (建材試験センター)		○		○			
吉村更一 (フルイドテクノロジー)					○		
大槻真人 (フルイドテクノロジー)					○		○
桐岡節男 (フルイドテクノロジー)					○	○	○
黄 弘 (東京大学)	○				○		
大竹 宏 (東京大学)	○				○		
筧 雅行 (富士総合研究所)					○		
後藤伸寿 (富士総合研究所)					○		
成瀬友宏 (建築研究所)						○	
鍵屋浩司 (国土技術政策総合研究所)						○	
高橋 済 (アイエヌジー)						○	
平澤一浩 (フルイドテクノロジー)						○	
永野紳一郎 (金沢工業大学)						○	○
程 洪 (グローシスジャパン)						○	
鴨川美紀 (グローシスジャパン)						○	
松山 賢 (東京理科大学)							○
田中 太 (東京理科大学)							○