

火災旋風発生に関する実験的研究

広部良輔*・米谷恒春**・森脇 寛**

国立防災科学技術センター

An experimental study of firestorm generation

by

R. Hirobe, T. Yonetani and H. Moriwaki

Abstract

A mass fire often occurs in a large city which has experienced a great earthquake, and as a result, a firestorm starts. A firestorm occurred after the Kanto earthquake and caused a great deal of damage to the Tokyo metropolitan area. In the Second World War, firestorms also occurred in many cities throughout the world, such as Hamburg, Germany.

There are three types of massive fires: one, a conflagration fire; two, a stationary firestorm (a firestorm in a narrow sense); and three, a moving firestorm. Of these types, the stationary firestorm and the moving firestorm are considered to be the so-called "firestorms", and experiments were conducted in order to study these two types of firestorms.

For the experiment for stationary firestorms, iron dishes were arranged on the ground to form an octagon. Wind guide screens were placed around the arranged dishes to be used as vanes. The dishes were fed with fuel alcohol and a fire was begun on the periphery of the octagonal form. A firewhirl was then made through the guide vanes. A thermal infrared camera recorded the temperature of the flame and video camera recorded the experiment. For the experiment of a moving firestorm, iron dishes were arranged in semi-circles, fed with alcohol, and eight fans blew in a horizontal direction from the outside of the semicircle. The temperature and shapes of the fire were observed in the same manner as mentioned above.

The results of the experiments are as follows. The stationary firestorm was interpreted by combustion aerodynamics and fluid dynamics. This type of fire storm will certainly occur in a massive fire. The moving firestorm was inferred from the Karman-vortex of fluid dynamics. There are few occurrences of this type of firestorm in massive fires. The probability for a firestorm occurrence has a mutual relation among the number of fire points, the building to land ratio, and the spreading rate of the fire. It was noted that if houses burn down within the threshold period, of a fire, a firestorm will not occur.

Key words : Fire, Firestorm

キーワード : 火災, 火災旋風

*第2研究部, **第1部研究部

1. ま え が き

火災旋風に関する本格的な研究は少なく、多くは目撃者の証言や過去の記録の調査であるが、寺田(1927)の関東大震災における記録は注目される。これは目撃者の証言をまとめたものだが、信頼性の高い貴重な事実が含まれている。また今村(1925)がまとめた同じ災害の記録も貴重で、横浜において1日に30個程度の大小様々の火災旋風が発生したと述べている。

第二次大戦において戦略爆撃により多くの都市が焼失したが、大火災時に火災旋風が発生したという記録が数多く認められる。Bond(1946)により編集された米国戦略爆撃調査の報告書によると、広島原爆攻撃における火災でも旋風が発生したという。またEbert(1963)によるとHamburgの戦災においては巨大な火災旋風が発生したという。これらの多くの戦災における火災旋風の例から判断すると、大火災時には火災旋風が発生する可能性は大きいと認めてよいであろう。

Lee(1972)は都市火災および森林火災について系統的に調査し、大火災(mass fire)には3つのタイプがあると分類している。第一は延焼型火災(conflagration type)、第二は静止型火災旋風(stationary fire storm type)、第三は移動型火災旋風(moving fire storm type)である。

第一の延焼型火災は1945年3月10日の東京大空襲における火災である。第二は静止型火災旋風は無風時または微風時に発生した広島原爆火災やHamburg火災での旋風である。第三の移動型火災旋風はAnderson(1968)の報告にある1967年、北部Idaho地方Sandanceにおける森林火災に相当する。この分類は研究を推進するに当り貴重なものであるが、いずれも秩序だった実験または観測が行われたわけではなく、多くは体験者の記録や偶然にえられた観測データを基にしている。これから判断しても、火災旋風時の研究は研究手法、データの収録などに大きな困難があり、通常のアプローチでは現象の解明は容易でないであろう。

この研究においてはconflagrationを除いた2つのモデルについて検証した。

模型実験として、現実の都市構造を構成する単位要素である時間、量、長さの中、時間についてのみ現実と同一の単位とし、他は縮尺を行った。模型の一軒が隣の一軒に延焼する実験をもとに、延焼時間と建物間隔の関係を求めた。一方、過去の実規模の延焼データから実家屋の延焼時間と建物間隔を求め、この模型と実規模の間を延焼時間を仲介させて関係づけた。出火点は容易に予想しえないことから、乱数によって発生させた。建ぺい率は東京のある市街区のデータを利用した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験施設

当センター構内にある大型降雨実験施設(縦48m, 横72m, 高さ10m)の内部において実験し

た。

2.2 モデル検証試験

1) 熱赤外線カメラ 富士通製インフラリア550を利用した。これはコントローラ、白黒テレビモニター、カラーテレビモニターより構成され、測定温度範囲は、0～1500°CでL：0～150°C，M：100～500°C，H：400～1500°Cの3段階に区分されている。さらに自動的に最高温度がセットできるようになっている。カメラの視野は水平25度，垂直度25度，測定距離は20～∞mである。データの表示はスポット温度，放射率補正，データナンバ，上限温度，下限温度をデジタルで行い，任意の位置で水平および垂直方向の温度分布を表示できる。データの読取りはカラーテレビモニターを連続的に写真撮影し現像焼付の後，カラー区分により温度を求めることにした。測定温度範囲を10段階に区分し，モニター画像は9秒ごとに变化させた。

2) 風速測定 風車型指示風速計(発電式)と定温度型熱式風速計(日本科学工業製)を使用した。

3) 送風機 横幅2m，高さ2.3mの外函に直径70cmの羽根をもつ4台のファンが取付けられた送風機を横並びに2ユニット取付け，全幅4mとし，総計8台のファンが動くように

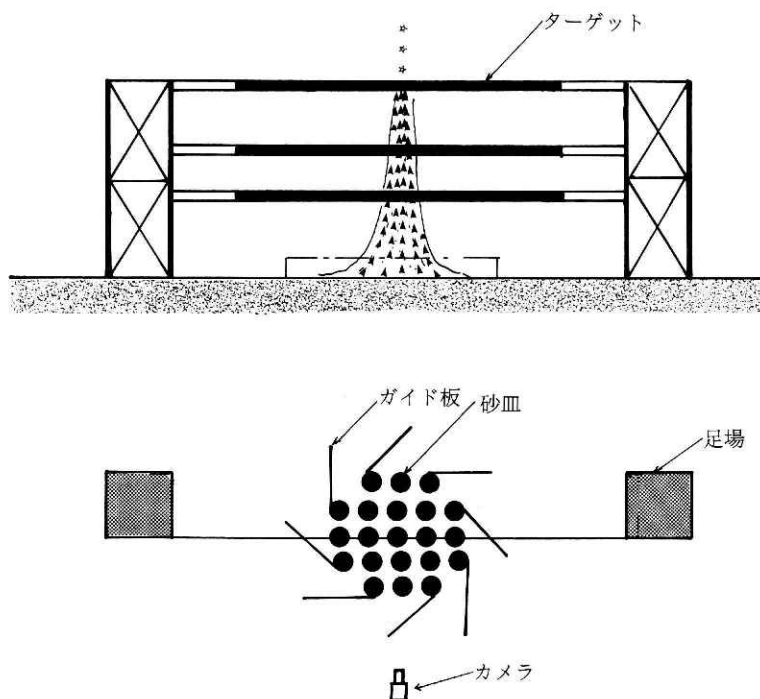


図1 静止型火災旋風実験の概略

Fig. 1 Aspect of stationary firestorm experiment.

なっている。(日本ブローア製)。風速は最大10m/sで、7.5, 5.0, 2.5m/sの4段階に変化できる。

2.2 実験方法

1) 静止型火災旋風(stationary fire storm), 直径200mm, 深さ25mmの鉄製皿を使用し, 間隔300mmで正八角形に並べ, 正八角形の直径を2.7, 2.1, 1.5mの3段階について実験した。各段階で人為的に火災旋風を生じさせた場合の実験も行うため, ガイド羽根を取付けた(図1)。燃料用アルコールに約10%硼酸を加え, 火焰を黄緑色に着色した。点火はガストーチを用い, 正八角形の周辺についてのみ行った。ターゲットは火焰により熱せられ, その温度を熱赤外カメラで間接的に測定し, 火焰温度の変化を検知した。

温度計測は, 縦150mm, 横150mm, 厚さ2mmのアルミ板にベルベットコーティングを施し黒色にし, ワイヤーで横方向に並べてターゲットとした。高さ3.7mの可搬式足場2台を間隔6mにセットし, この足場の間に高さ1.3, 1.8, 2.3mの3段階にアルミターゲットを水平

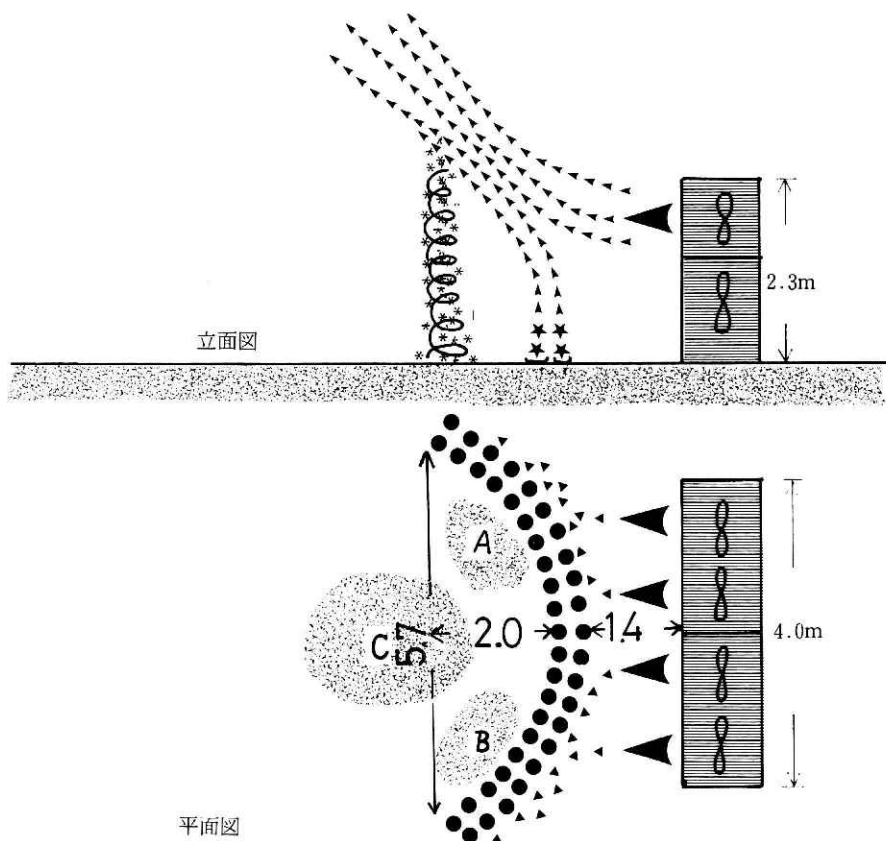


図2 移動型火災旋風実験の概略
Fig. 2 Aspect of moving firestorm experiment.

に張った。このターゲット列は正八角形の砂皿郡の中心上を通るようにした。熱赤外カメラはターゲットの直前方20mに設置し、最高温度400°Cとオートの2通りについて実験した。

風速は熱式風速計を地上約20cm、火焰外周より2mにセットして自記記録した。火焰よりの輻射を回避するよう工夫した。

2) 移動型火災旋風(moving fire storm), 送風機の前面に半円形に砂皿(直径200mφ)を2列に並べ、半円の中心に向かって外側から送風した。送風機は上半分のみを運転し、下半分は停止した。半円の内側には新聞紙を焼いて作った灰を敷きつめ、発生する旋風の動きをビデオカメラで撮影した(図2)。

風速測定は砂皿へ着火以前に送風機のみを運転した場合について行い、次いで送風機の運転を停止して砂皿のみに着火した場合の上昇気流を測定した。最後に砂皿に着火し送風機を運転した場合について、半円の中心線上の風速測定を行った。

2.3 模型実験

家屋模型は縮尺を200分の1にし、着火から焼失までの時間を30分とした。35×35mmの正方形で厚さ10mm、中心に綿三芯よりの長さ40mmの芯を取付けた。材質はパラフィンである。この模型が横風によって隣の模型に着火する時間を測定し、間隔との関係を実験により求めた。

横風は小型ファンを用い、乱れの小さい風が送られるよう中間に網を置いた。風速(150mm/s)は熱線風速計により測定した。この結果を図3に示す。

$$t_2 = 1/12 \cdot D + 7/4 \quad (1)$$

t_2 : 延焼着火時間(分), D : 間隙(mm)

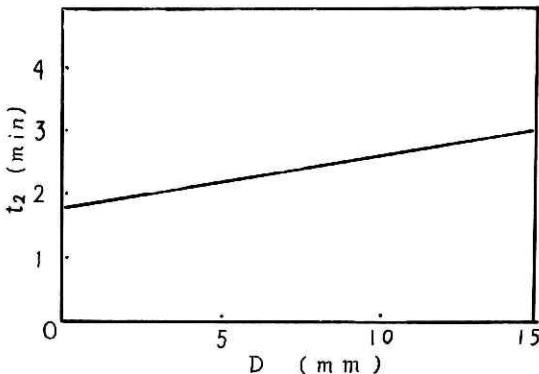


図3 模型建物の間隙と延焼着火時間の関係

Fig. 3 Relation of gap between model houses to the spreading time of fire.

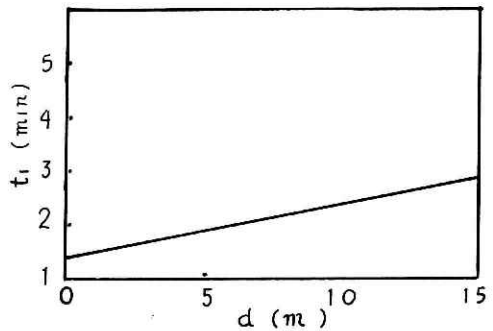


図4 実大建物の間隙と延焼着火時間の関係

Fig. 4 Relation of gap between real houses to the spreading time of fire.

都市模型の作成に当っては浜田(1951)による実験結果を利用した。木造平屋が風速30m/sにおいて延焼する関係を利用した(図4)。

$$t_1 = 1/10 \cdot d + 7/5 \quad (2)$$

t_1 ; 延焼着火時間(分), d ; 実大建物の間隔(m)

(1)(2)式の関係から、時間を仲介させて実大家屋と模型の間隔の関係がえられる。この関係を求め、都市模型を作成した。

3. 実験結果

3.1 静止型火災旋風

1) 旋風の生じぬ時、外周に点火した火焰は時間の経過と共に中心に向かって漸次着火し、最終的には全部の砂皿のアルコールに着火した。中心部分は集合火焰となり火焰を高くし、温度も中心部分が一番高くなった(図5)。時間がさらに経過すると中心部分のアルコールが最初に燃えつき、燃えつきた砂皿は中心から周辺に向かって徐々に広がって行った。最終的には最初に点火した外周の砂皿の焰が残ることになった。この経過は整然として焰の傾は中心方向に完全に一致していた。ガイド版なしでは旋風は生じず、中心部の火焰が高くのびるだけだが、断続的な振動音を発して、中心の焰の高さが伸縮を繰り返した。これは中心火焰の燃焼の最盛期にとくに激しかった。

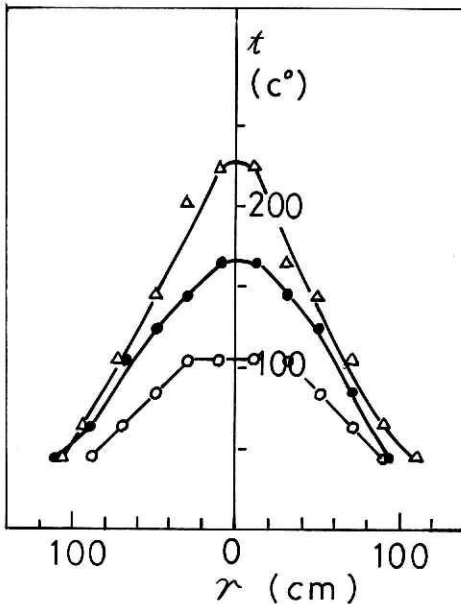


図5 半径方向とターゲットの温度分布の関係

Fig. 5 Relation of target temperature to flame radius.

2) 旋風の発生時, ガイド板を取付け旋風を発生させると, 周辺に着火した焰が中心に進み最終的には周辺の砂皿の焰が残るというプロセスは非旋風時と全く同じであるが, 点火から終了までの経過時間はずっと小さくなる. さらに火焰の高さも大きくなり, 息をする振動音はほとんど無くなって来る. さらに中心部分の平均的溫度は無旋風時に比して大きくなり, 正八角形の直径が大きくなるにつれ, さらに溫度差は大きくなるようである.(図6).

3) 非対称配置による旋風発生時, 正八角形の一部分を取除き対称でない配置にして点火を周辺に沿って行くと, 第7図に示すように2個所で旋回火焰が生じた. また中心部分が燃えつきて周辺に拡がって行く過程では, 燃えつきた部分との境界に当る砂皿の周辺が回転し, 小さい旋回流を生じた. このようにガイド板を用いずとも非対称にすることにより旋風は生じていることがわかる(図8).

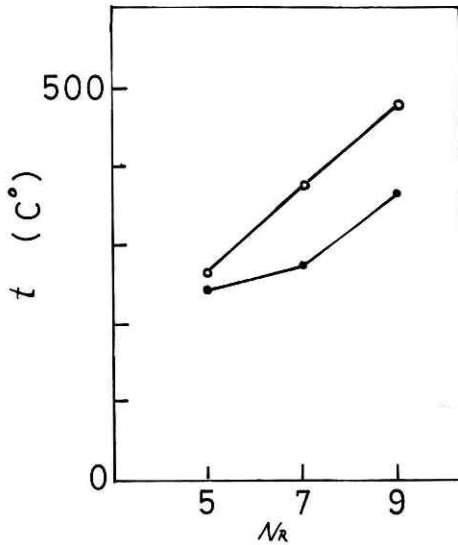


図6 直径方向の砂皿数とターゲット温度の関係(○旋風時●非旋風時)

Fig. 6 Relation of target temperature to dish numbers on diameter.

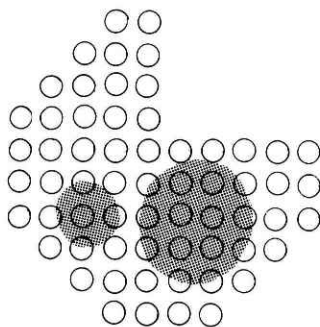


図7 大型旋回火焰の発生状況
Fig. 7 Aspect of big firewhirl.

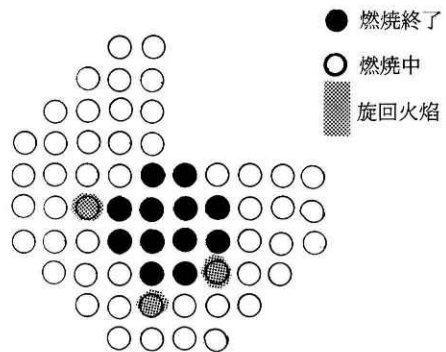


図8 砂皿単位の旋風発生状況
Fig. 8 Firewhirl in each dish.

3.2 移動型火災旋風

図9, 図2に示すように弓状に配置したさな皿の火焰に外側から上半分を送風すると, 暫くの間は弓形の中心に向かって送風とは逆方向に気流を吸い込む動きがあり, 新聞紙灰が中心に向かって移動する. やがてC地域での緩い逆時計廻りの大きな旋風が生じ始める. C地域での旋風に続いてB地域では時計廻り, A地域では逆時計廻りのかなり強い小型旋風が生じ, 成長, 減衰を繰り返しながら最後まで動き廻った. 発生頻度は15分間に大小合せて44個生じ, 発生前に約2分間の誘導時間があり, 発生後はほぼ同じ頻度で経過している(図10).

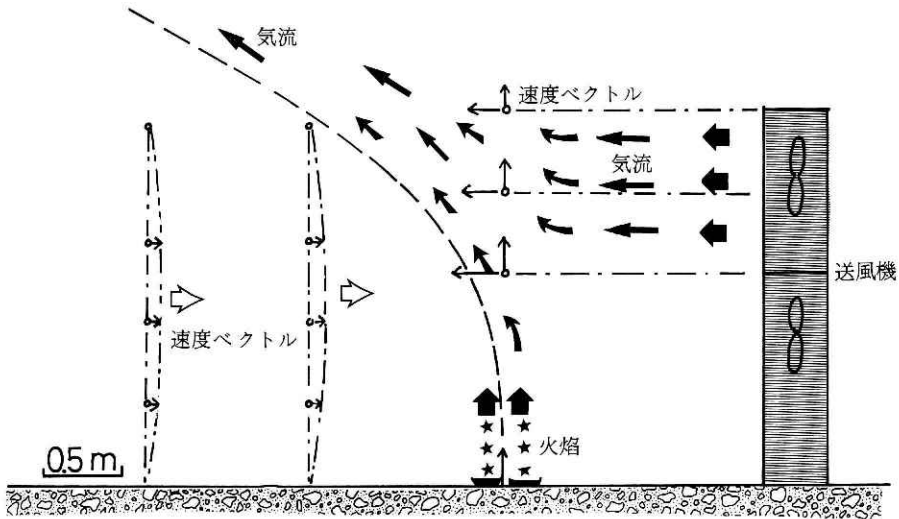


図9 移動型火災旋風実験における気流断面図

Fig. 9 Air stream on moving firestorm.

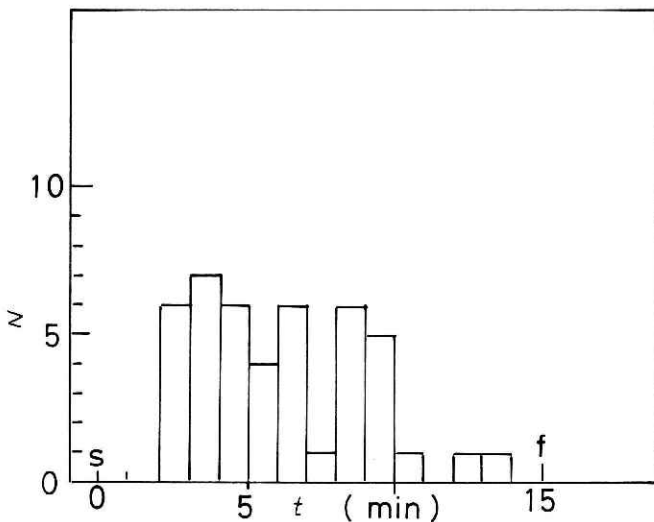


図10 経過時間と発生数の関係

Fig. 10 Relation of numbers of moving firestorm to elapsed time.

3.3 模型実験

東京のある居住区の建ぺい率は20～70%であり、平均は約38%である。このため建ぺい率70%、40%、30%、20%の模型を作り、出火率2%、4%、8%、12%、16%、20%、24%について乱数に従って出火点を決定した。建ぺい率の大きい場合には小さい出火率でも大合流火焰が発生したが、建ぺい率が小さくなると出火率を大きくしないと大合流火焰は発生せず、未燃焼建物模型を残して立消えとなった。図11にこの関係を示すが、建ぺい率、出火率、合流火焰の発生時間の相互関係を示すものである。大合流火焰の発生と共に容易に火災旋風の発生が認められた。写真1は点火直後で火焰の傾きが様々である。写真2は立消えになった状態、写真3は大合流火焰に進行する状態、写真4は大合流火焰を示している。

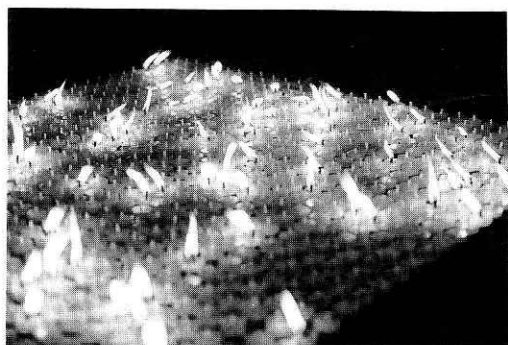


写真1 点火直後
Photo 1 A view from just behind the ignition.



写真2 立消え状況
Photo 2 The extinguishing of the fire.

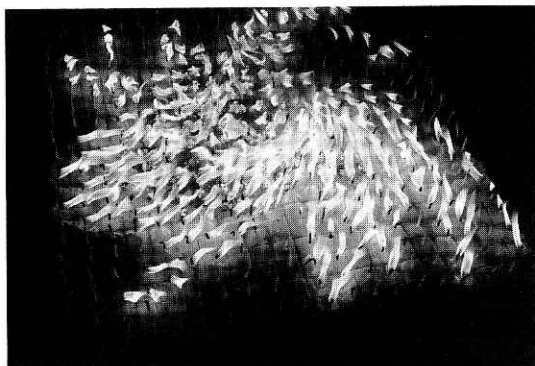


写真3 火災旋風への過程
Photo 3 The developing firestorm.



写真4 大合流火焰
Photo 4 A concentrated flame (or the concentrated flames).

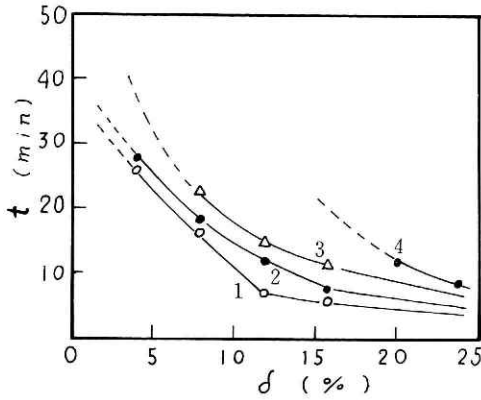


図11 出火率と合流火焰発生時間の関係
1: 70% 建ぺい率 3: 30% 2: 40%
4: 20%

Fig. 11 Relation of ignition ratio to threshold time for firestorm. 1.70% building to land ratio, 2.40%, 3.30%, 4.20%

4. 考 察

4.1 静止型火災旋風

たつまき、砂塵旋風、火災旋風など大気中で発生する旋風は、多かれ少なかれ周囲の渦度 (vorticity) をも同時に利用し、渦核(vortex core)の中に渦度を取込む集中化メカニズムを持っている。周囲の渦度は気象擾乱や地球自転などによる地表近くの気流の乱れによって生じる。集中化作業の一つは浮力を持った円柱状の上昇気流である。火焰からの熱いガスの不安定層が上昇気流の円柱を生成する。円柱の側面では乱流混合が行われ、周囲の渦度をもつ空気を上へと運ぶ。もしこれがプロセスのすべてであれば、大気中の旋風は大して問題にはならないのだが、2つの他の効果も同時に生じるので重大になってくる。Emmons(1967)によると。

1) 渦度の内部と周囲との境界部分において、空気の回転が上昇気流の乱れを減少させる。なぜなら空気が中心軸へ向かう運動を遠心力が妨げる。Rankinの2重渦モデルにおける外側の自由渦自体について言えば、角運動量 (angular momentum) は一定で、放射方向での気体交換は安定している。しかし、内側の渦核の中では角運動モーメントは低下し、中心軸でゼロになる。このコア内部における放射方向での気体交換も安定している。この結果、コア内の気体浮力は混合によって急速に減少せず、大きな浮力が非常に高い所まで維持される。

2) 地面は空気の回転運動を遅くする。この結果生じる、放射方向の圧力勾配が境界層の空気を中心に引込む。大量の境界層空気が渦核の中に入ってくる。火災旋風では地上風の放射成分は渦核に浮力を与えるのに役立つだけでなく、重要なことは燃え続ける間、渦核に燃料を供給する。

Beer and Chigier(1972)によると、火災旋風においては渦核と自由渦との境界が円柱状火焰の境界と一致することから、遠心力のみならず半径方向の密度勾配により成層化が進み、境界層は一段と安定化するという。

Prandtl(1961)によると、成層化した火焰の安定性は、Reynolds数に關与するだけでなく、成層パラメータにも左右されるとしている。

図6の結果は旋風時には遠心力および成層化を促進する密度勾配により、境界層が安定化し乱流混合が行われなくなり、側面での空気の流入がなくなり、酸素不足が生じ火焰が高くのびたため、ターゲットの温度が非旋風時より高くなっている。また旋風時に“いき”が聞こえなくなるのは火焰が乱流火焰より層流火焰に変化したためと考えることも可能で境界層の安定化現象は、一旦旋風が発生すれば容易に消滅しないことを示している。図12に示すようにAにおける無旋風状態の火焰が、なんらかのチャンスでBの状態の旋風になると、容易に元に戻らなくなる。図7、図8のように流入時の片寄り、燃え方の異方性、地上の形態などによって、容易に旋風は発生し、一旦発生すれば永続することになる。

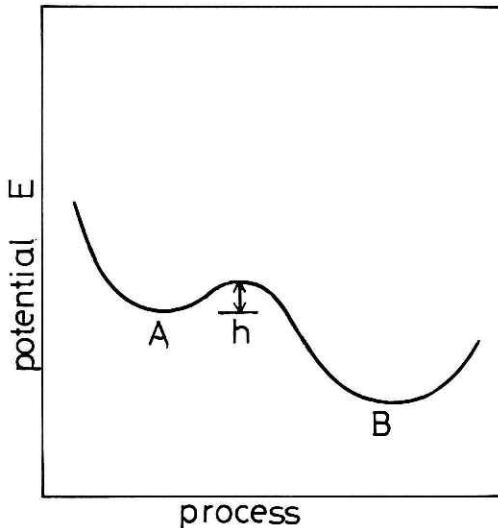


図12 静止型火災旋風の発生プロセスとポテンシャルエネルギーの関係

Fig. 12 Relation of potential energy to creation process for firestorm.

4.2 移動型火災旋風

図9からわかるように、横風は火焰による上昇気流に衝突して上方に曲げられる。また水平方向は火焰の配列の外側に沿って屈曲して流れる。火焰の上昇気流はあたかも横風前方に物体が存在するかのような役割をはたしている。もちろん横風と上昇気流の強さの相互関係は重要で、横風が強すぎれば上昇気流は横方向へなぎ倒されてしまう。また物体の抵抗係数 (coefficient of drag) は形状によって異なることから、燃焼領域の形状によって横風の流れも大きく異なることが予想できる。火焰地帯の上昇気流と横風の間形成される境界層の役割が重要になってくる。

境界層の流れはその外側の気体の圧力勾配によって大きく影響され、圧力上昇のある場合には層流から乱流に遷移することがある。外側の流れも圧力上昇により減速されるが、境界

層内の空気は粘度によるばかりでなく、圧力上昇に抗して運動するため運動エネルギーを失い、その分だけ減速される。さらに持続すると運動エネルギーを完全に失って静止する。この時には逆に圧力の低い方向に流れが生じ、物体表面近くで上流に向かう流れが現れ、下流に向かう流れと衝突する。この結果、境界層の流れが物体表面から離れるという剥離現象(separation)が生じ、当然のことながら渦が生じることになる。

剥離部分は境界層に比して非常に厚く、流れ全体もこの影響をうけ、圧力分布は変化してくる。一方、剥離の位置や不連続面はこの影響をうけ、剥離領域も不安定に動揺する。さらに剥離により生じた渦は、物体の後方に流され、渦の流れを作る。この流れは交互に現れカルマン渦(karman vortex)となる(図13)。図2に示す渦領域はカルマン渦の発生域とも考えられ、図10に示すように定常的に発生するのではなからうか。

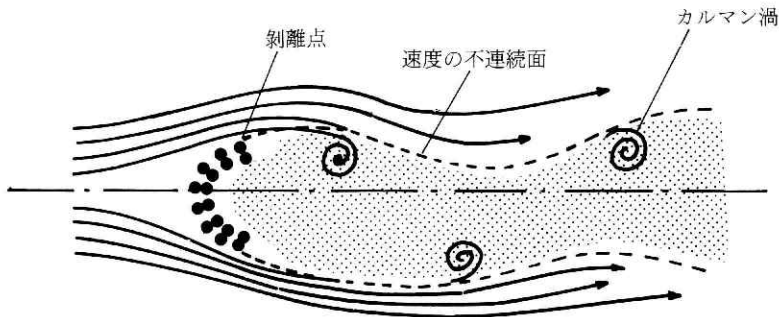


図13 移動型火災旋風の発生モデル
Fig. 13 Model of moving firestorm.

4.3 模型実験

火災の延焼拡大の経過は、各出火点の炎が気流の方向が一様でないことから、最初は様々な方向に傾き、隣の模型に延焼する。やがて延焼したグループが数多く作られ、このグループがさらに合体して大きな火災地帯を形成する。この火災地帯は4~5個所から2個所ぐらいになり、さらに合体して1個所の大合流火焰になる。もちろん出火率が非常に大きいとグループを形成することなく1個所の大合流火焰を直接形成するし、建べい率が小さく出火率が小さいときなどは、グループが多少できても合流する前に各模型が燃えつきて立消えとなり、着火しない模型の個所を残して火災は終わってしまう。このように図11に示すように、建べい率、出火率、大合流火焰の発生時間の間には相互関係があり、この3要素により形成される3次元曲面は、火災旋風の発生する条件を示すことになる。

5. あとがき

静止型火災旋風は大火災ではほとんど間違いなく発生するであろうが、移動型はよほど条件がそろわないと発生しないであろう。この理由から模型実験は静止型についてのみ行った。この実験では第一にモデル検証が行われ、従来、明確でなかった火災旋風の分類を行った。第二にはこのモデルの発生確率について大よその目当てをつけることができた。第三には最も発生率が高く、被害の大きい静止型について、実際の都市条件との適応を考える実験を行った。燃焼力学、流体力学の立場から、火災旋風の理論化を試み、根拠を与えることにした。

謝 辞

この研究を行うに当たり、当センターの多くの方々の支援を賜り、厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Anderson(1968) : Sundance fire, US. D. A. Forest Service Research Paper INT-56.
- 2) Beer and Chigier(1972) : Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers Ltd.
- 3) Bond(1946) : Fire and The Air War, National fire Protection Association.
- 4) Ebert(1963) : Humburg firestorm Weather, NFPA Quartely, p253.
- 5) Emmons(1967) : The Fire Whirl, 11th Symposium (international) on Combustion, p475.
- 6) 浜田 稔(1951) : 火災の延焼速度について, 火災の研究, 火災科学研究会, P35.
- 7) 今村明恒(1925) : 関東大地震に因れる各地方火災, 震災予防調査会報告
- 8) Lee(1972) : Fire Research, Applied Mechanics Review, p503.
- 9) Prandtl(1961) : Collected works, vo12, Springer-Verlag, Berlin.
- 10) 寺田 寅彦(1927) : 大正12年9月1日の旋風に就て, 震災予防調査会報告

(1989年9月29日原稿受理)