

## 乱流境界層内の高温熱流場の気流・温度性状に関する実験的研究

丸山 敬・田中喙義

### 要 旨

市街地火災において上空の高温熱流場を含めた市街地火災の予測手法の確立に向けて、強風時の市街地火災における熱気流の性状を解明するための基礎データを得ることを目的に、風洞実験により粗度後方に発達した乱流境界層内の火炎後流の高温熱流場における風速と温度の同時計測システムの構築を行った。そして、測定された結果より火炎後流の風速・温度の性状を明らかにした。

キーワード：火炎，熱気流，気流性状，温度性状，乱流境界層，風洞実験

### 1. はじめに

弱風時に火災が発生した場合に比べ、強風時の火災被害の規模は遙かに大きくなる。一般に、市街地火災における熱気流は輻射や飛び火と並んで延焼の重要なメカニズムの一つであり、また、熱気流の広がり方はそのときに吹いている風に左右されて消火や避難にも大きな影響を及ぼす。したがって、強風時の市街地火災における熱気流の性状を解明することは、延焼速度の予測および火災時の消火活動や避難計画を立てる上で非常に重要である。

市街地では種々の建物や構造物、植物などが複雑に分布して地表面には複雑な形状をもった凹凸が存在する。このような凹凸を粗度と呼び、地面付近の気流性状は付近や風上側の粗度の影響を受けて変化する。通常、市街地に強風が吹く場合には、気流は乱れたものとなり、上空には乱流境界層が発達する。このため、市街地火災における熱気流を考える場合には、乱流境界層内の高温熱流場の気流・温度性状を知らねばならない。これまで、市街地火災における火災気流に関しては種々の実験的研究が行われている<sup>例</sup>として<sup>1,2)</sup>が、温度場の性状だけを扱ったものがほとんどであり、気流性状も同時に計測した研究はあまりない。また、市街地における延焼の予測に関しても、過去の実火災に基づく経験式が基礎となっており、上空の高温熱流場の影響、建物の燃焼、輻射や飛び火等の物理的影響を取り込んだ手法は無いのが現状である。

そこで、本研究では上空の高温熱流場を含めた市街地火

災の予測手法の確立に向けて、気流・温度性状の予測を相似則および物理的影響を取り込んだモデルに基づく数値計算の両面から行うための基礎データを得ることを目的に、風洞実験により火炎後流の高温熱流場における風速と温度の同時計測システムを構築し、測定結果から火炎後流の風速・温度性状を明らかにする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 測定概要

相似則および数値計算による高温熱流場の気流・温度性状の予測手法の開発を行う際の比較・検証用のデータを得ることを目的に、粗面上に発達した乱流境界層内に置かれた火炎周囲の熱流場の定量的把握を行う。そのため、気流・温度性状の予測の対象となる領域内および境界上の気流および温度変動の測定を行う。また、火炎の燃焼性状に関しては、発熱量および火炎の形状を調べた。

#### 2.2 火口

実験は、石綿板で作った幅60cm高さ84cm長さ560cmの耐火チャンネルを図1に示すように風洞内に設置し、床面の火口から炎を発生させて下流の風速・温度変動や床面の温度分布の測定を行う。座標系は図2,3に示すように火口の後縁中央を原点とし、風向方向にx軸、風向直角方向にy軸、鉛直方向にz軸をとる。耐火チャンネルの床面には風向直角方向に幅50cm風向方向幅5cm高さ8cmの鉄製

の箱を図2 aのように埋込み、風向直角方向に帯状（二次元）の火口とした。火口の両側5cmは鉄板で覆い、火炎と壁面の距離をあけてある。火口の上端は耐火チャンネルの床面と一致させてあり、また、火口の下部には図2 bのように鉄製の箱をおき、中に水を通して火口部分の温度上昇を抑えている。燃料にはメチルアルコールを用いた。その際、図3に示すように光電スイッチを用いて液面を火口の上端から1mm程度の高さに保つようにアルコールを供給した。消費されるアルコールの量はタンクの重さの変化を量ることで求めた。

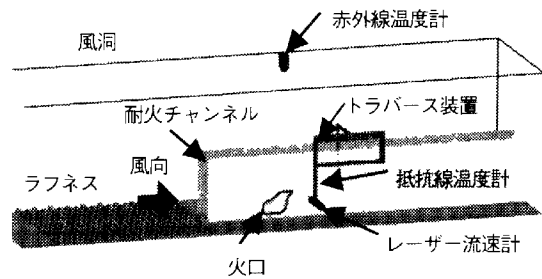


図1 風洞内の測定配置概要

### 2.3 床面温度の測定

火口の後方、耐火チャンネルの床面の表面温度は熱電対および赤外線温度計（日本アピオニクス株式会社製ハンディサーモTVS-120）を用いて測定した。熱電対は床面中央、火口後方に10および20cm間隔でセンサーの測定部が床面表面にくるように埋め込んだ。赤外線温度計は赤外線強度を測るビデオカメラで、写された物体の表面温度が測定できる。このビデオカメラを測定部上方の天井面に穴をあけて設置し、火口およびその風下側床面を撮影した。計測に際して必要となる床面の放射率は、床面の熱電対温度によって検定し、設定した。

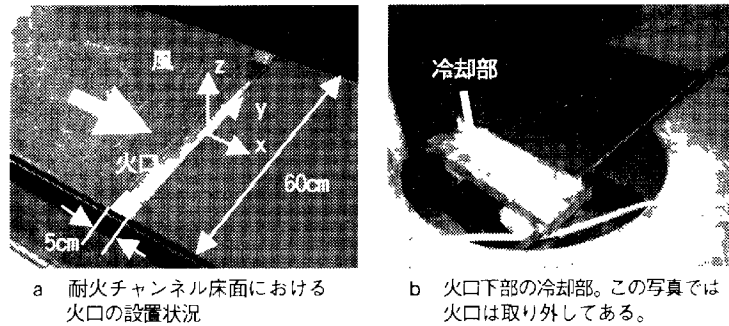


図2 火口の詳細

### 2.4 火炎形状の測定

火炎は側方、後方、上方に設置したビデオカメラによって3次元的な形状がわかるように同時撮影し、記録した。このとき図4に示すように、赤外線温度計による画像も同時にビデオレコーダーに録画した。

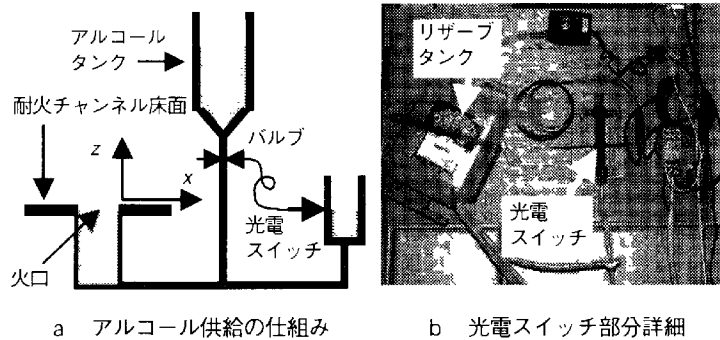


図3 アルコールの供給

### 2.5 風速の測定

測定部の耐火チャンネル前方には図5に示すように一辺6cmの立方体粗度ブロックを手鳥状に約11m敷き詰めて乱流境界層を発達させ、十分乱れた流れを流入風として与えている。気流性状は後で示すように風速によって少しずつ変化するが、耐火チャンネル入り口では境界層の厚さは約70cmであった。

風速の測定には、熱線流速計（日本カノマックス株式会社製熱線流速計 SYSTEM7202）、超音波流速計（株式会社カイジョー製超音波流速計 DA-290/TR52 型プローブ）およびレーザー流速計（TSI 社製レーザードップラー流速計 SYSTEM90-3）を用いた。流入風の気流性状および火炎が無い場合の気流性状の測定には熱線流速計を用いた。ただし、用いた熱線流速計は今回風速の計測を行った範囲 1.9m/s 以下では、温度および経時変化による基準点の変化が問題

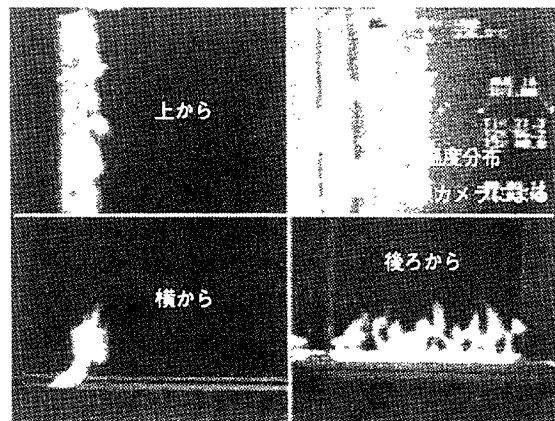
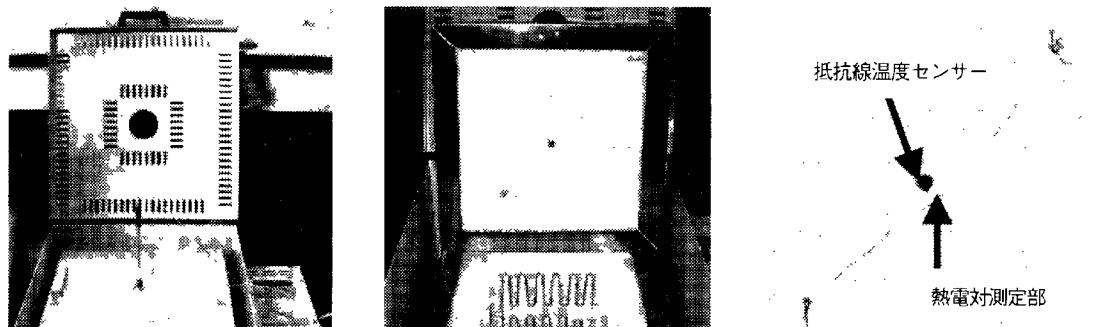


図4 ビデオカメラによる炎の形状および温度分布の同時記録



a. 検定の様子  
抵抗線温度計のセンサーを挿入して検定を行っているところ。

b. 炉の蓋を開けて内部をみたところ  
蓋の中央にセンサーを挿入する穴が開いており、そこから図cに示すように抵抗温度計のプロープを挿入して検定を行った。

c. 蓋に開いたセンサー挿入口  
抵抗線温度計の先端が電気炉内部に出るようにセンサーを挿入したところ。近くに熱電対の測定部分がくるようにセットしてある。

図12 抵抗線温度計の検定

検定は最高約1200℃まで温度を上げることができる電気炉を用いて行い、校正には熱電対を用いた。検定の際の温度変化は非常にゆるやかで、応答速度の影響はあまりないと考えられる。

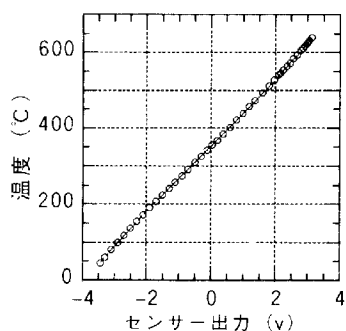


図13 抵抗線温度計の検定結果の例

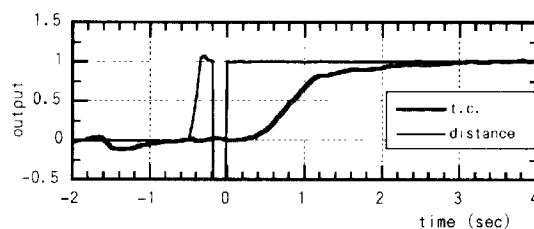


図15 熱電対の応答特性

時間0の時点でセンサーを検定用風洞の中に入れた後の出力の変化。

表1 各条件における時定数(秒)

風速(m/s)	0.50	1.25	2.00
温度差(°C)			
28	0.65		0.45
48	0.80	0.80	0.50
68	0.80	0.70	0.50

周囲媒体 ; 空気  
 周囲温度 ( $T_0$ ) ; 12 °C  
 検定用風洞の温度 ( $T_{max}$ ) ; 40, 60, 80 °C  
 検定用風洞の風速 ; 0.5, 1.25, 2.0m/s

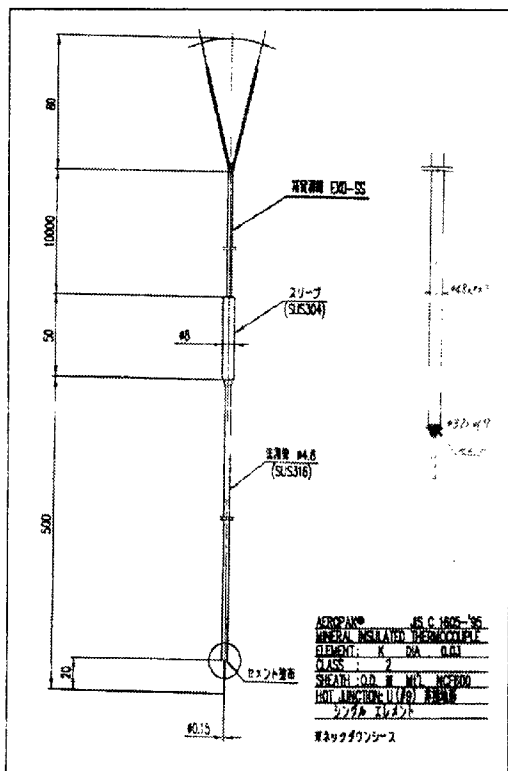


図14 熱電対のプロープ形状

測定結果から求めた各条件における時定数の一覧を表1に示す。表に示すように、0.5~0.8秒の遅れがみられ、測定結果にもこの影響が表れると予想される。そこで、抵抗線温度計と同時に測定された同じ位置での出力を見てみると、図16のように抵抗線温度計よりも滑らかになりパワースペクトルも高周波数側における減衰が大きい。また、平均値(流入風温度からの差 $\Delta T$ で表示)と標準偏差の分布を見ると、図17のように、抵抗線温度計に比べ熱

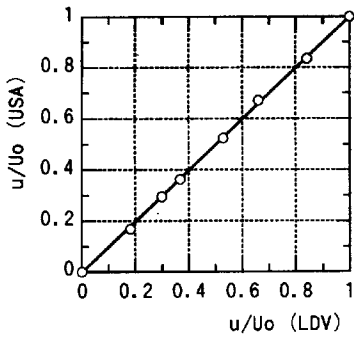


図9 レーザ流速計 (LDVと表示;横軸) と超音波流速計 (USAと表示;縦軸) による風速測定結果の比較。

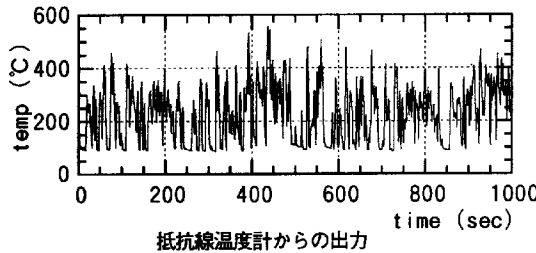


図11 抵抗線温度計による測定結果:  $U_o=0.55\text{m/s}$ ,  $x=300$ ,  $z=100\text{mm}$

## 2.6 温度の測定

相似則および数値計算の比較・検証用のデータとしては、気流の温度測定は平均値だけでなく変動成分も測れることが要求される。さらに、風速変動成分との同時測定が可能であることが望ましい。以上の要求性能を考慮して温度の測定には抵抗線温度計を用いることとした。

測定に用いる抵抗線温度計プローブは火炎後方で測定を行うため耐熱性を有するものでなければならない。ここでは、図10のような形状を持った高温度用プローブ(DANTEC社製55A75)を用いた。このプローブのセンサー部はプラチナ/ロジウム(90/10)合金で、直径 $10\mu\text{m}$ 、長さ $2.2\text{mm}$ 、抵抗値 $6\Omega$ 、抵抗の温度変化率 $0.16\%/^{\circ}\text{C}$ 、最大耐用温度 $800^{\circ}\text{C}$ 、最大周囲温度 $750^{\circ}\text{C}$ 、最大周囲圧力 $100\text{bar}$ 、最小風速 $0.20\text{m/s}$ 、最大風速 $350\text{m/s}$ 、最大応答周波数 $150\text{Hz}$ 、測定媒体は空気である。実際の応答周波数は、測定時のアンプ・ケーブル等を含めた計測システムの構成により変化するので、測定時の温度変動のデータをスペクトル解析してチェックした。測定記録およびスペクトルの一例を図11に示す。温度のサンプリングは $80\text{Hz}$ で行い、 $40\text{Hz}$ のローパスフィルターを通して記録しているが、スペクトルの変化より、高周波成分における急激なパワーの低下が見られないので、数十Hzまでの変動に追従していることがわかる。温度の測定はあまり炎に近づけないとしても $700^{\circ}\text{C}$ 以上を目標としており、センサーの検定には図12のような電気炉を用いた。検定時の温度校正には熱電対を用いている。プローブの検定結果の例を図13に示す。こ

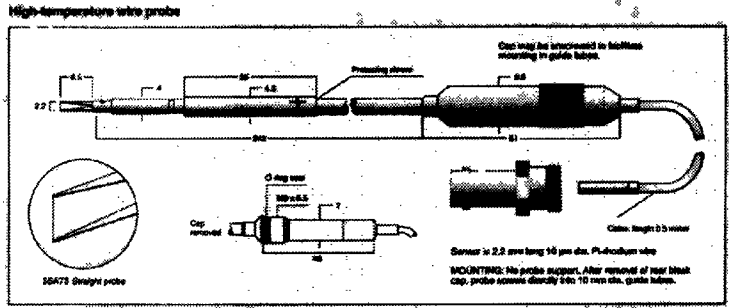
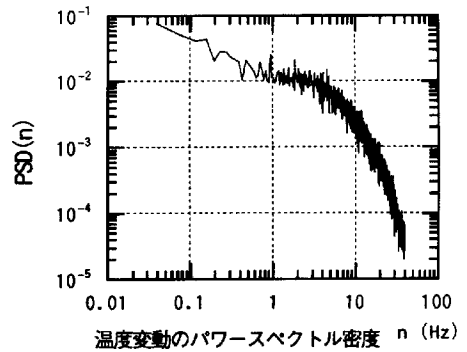


図10 抵抗線温度計のプローブ形状



のとき、センサーの出力はほぼ直線になり、図に示すように3次関数で表すと全測定範囲を良く近似できる。ただし、センサーの測定レンジはかなり大きいので、炎から離れた場所で温度が低く、また変動も小さい場所では、アンプの経時変化によるバイアスや倍率の変化によっては、近似曲線のパラメータの与え方によって温度の測定値の誤差が大きくなる場合がある。そのため、流れ部分の温度の測定にあたっては図14に示すような感部の非常に細い熱電対温度計を併用している。

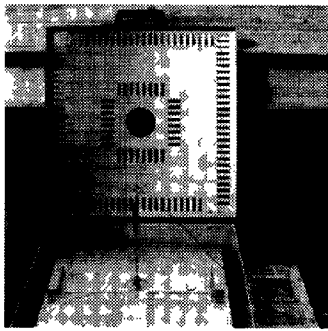
ここで用いた熱電対は、k型シース熱電対(株式会社岡崎製作所製T34)で、プローブの直径は $0.15\text{mm}$ 、使用最大平均温度 $400^{\circ}\text{C}$ である。実験を始める前に、校正用の温度風洞を用いて、この熱電対の時定数を検定した。外気と温度差のある校正用風洞の中に、熱電対を急に入れたときの出力を記録し、図15に示すような出力の変化から以下のようにして時定数を求めた。すなわち、時定数は、

$$\frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0} \geq 0.632 \quad \dots (1)$$

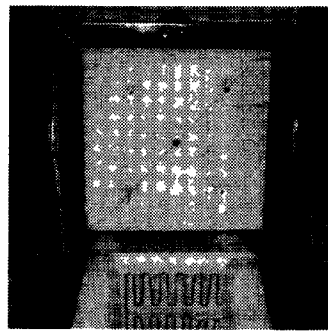
となった時間 $t_1$ から、

$$\frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0} \geq 0.05 \quad \dots (2)$$

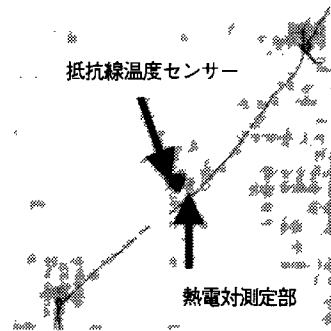
となったむだ時間 $t_2$ を引いた時間 $t_1 - t_2$ として1次遅れ時定数を求めた。ここで $T_{\max}$ は校正用風洞内の温度、 $T_0$ は外気温度である。また、検定は以下の条件で行った。



a, 検定の様子  
抵抗線温度計のセンサーを挿入して検定を行っているところ。



b, 炉の蓋を開けて内部をみたところ  
蓋の中央にセンサーを挿入する穴が開いており、そこから図cに示すように抵抗温度計のプローブを挿入して検定を行った。



c, 蓋に開いたセンサー挿入口  
抵抗線温度計の先端が電気炉内部に入るようにセンサーを挿入したところ。近くに熱電対の測定部分がくるようにセットしてある。

図12 抵抗線温度計の検定

検定は最高約1200℃まで温度を上げることができる電気炉を用いて行い、校正には熱電対を用いた。検定際の温度変化は非常にゆるやかで、応答速度の影響はあまりないと考えられる。

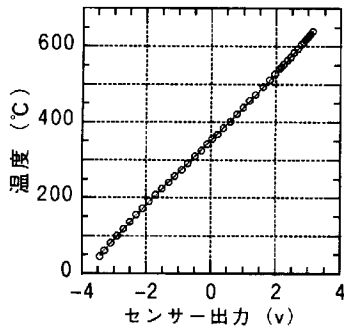


図13 抵抗線温度計の検定結果の例

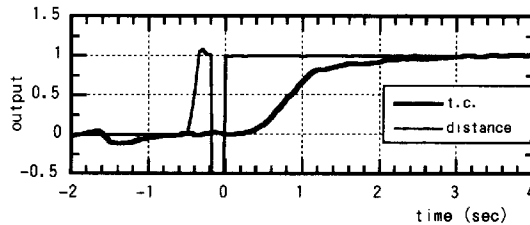


図15 熱電対の応答特性

時間0の時点でセンサーを検定用風洞の中に入れた後の出力の変化。

表1 各条件における時定数 (秒)

風速(m/s)	0.50	1.25	2.00
温度差(°C)			
28	0.65		0.45
48	0.80	0.80	0.50
68	0.80	0.70	0.50

周囲媒体 ; 空気  
 周囲温度 ( $T_0$ ) ; 12°C  
 検定用風洞の温度 ( $T_{max}$ ) ; 40, 60, 80°C  
 検定用風洞の風速 ; 0.5, 1.25, 2.0m/s

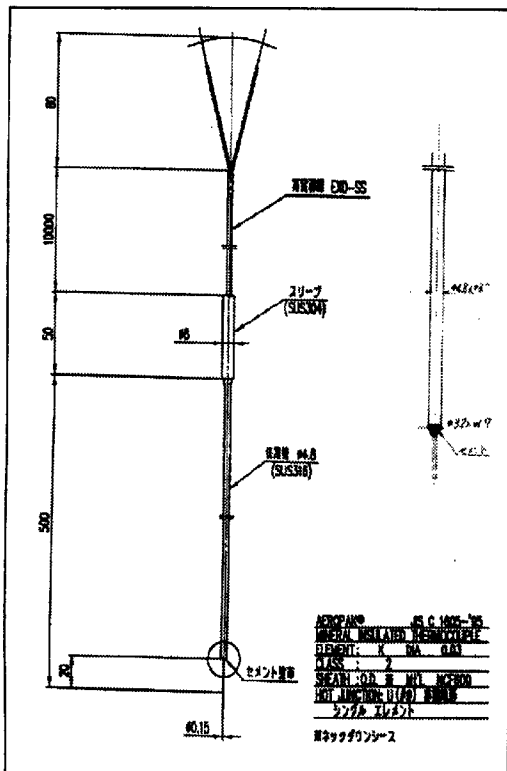


図14 熱電対のプローブ形状

測定結果から求めた各条件における時定数の一覧を表1に示す。表に示すように、0.5~0.8秒の遅れがみられ、測定結果にもこの影響が表れると予想される。そこで、抵抗線温度計と同時に測定された同じ位置での出力を見てみると、図16のように抵抗線温度計よりも滑らかになりパワースペクトルも高周波数側における減衰が大きい。また、平均値(流入風温度からの差 $\Delta T$ で表示)と標準偏差の分布を見ると、図17のように、抵抗線温度計に比べ熱

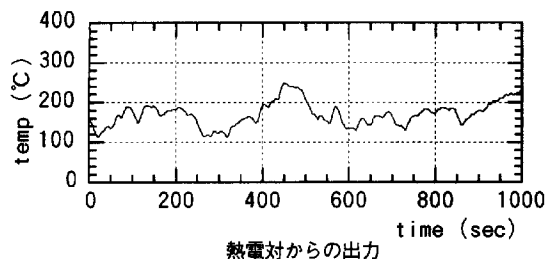


図 16 熱電対による測定結果： $U_0=0.55\text{m/s}$ ,  $x=300$ ,  $z=100\text{mm}$ .

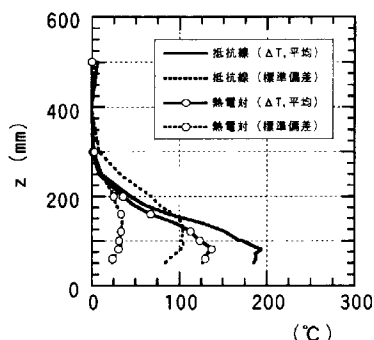
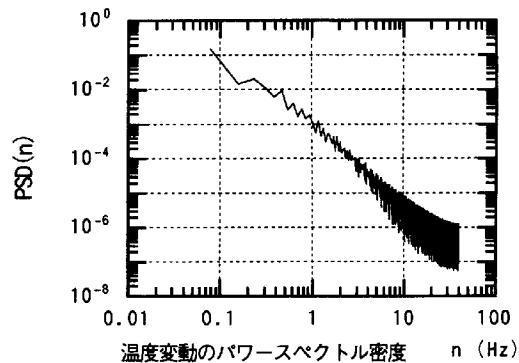


図 17 センサーによる測定結果の違い：  
 $U_0=0.55\text{m/s}$ ,  $x=300\text{mm}$

抵抗線温度計に比べて、応答速度の遅い熱電対のほうが、  
平均値、標準偏差ともに小さくなる。

電対の測定値のほうが小さくなっている。

以上のように、応答特性の異なる温度センサーを用いると測定結果に影響が及び、ここで比較した抵抗線温度計と熱電対では、応答速度の速い抵抗線温度計のほうが平均値、標準偏差ともに大きな値をとる。抵抗線温度計で測定された結果が今回用いたサンプリング数波数で温度変動を十分捉えているとして、図 11 が実際の温度変動を示しているとすると、火炎後方の温度変動はある平均値を中心に変動するのではなく、高い温度をもった空気の塊が通過する際に温度が上昇し、それ以外では流入風の温度をもった一定な値が続いている。したがって、温度変動は上に凸な変動が一定温度の上に乗っているような波形を持つ。このため、応答速度が遅い熱電対の測定結果では図 16 に示すように、この上に凸な変動部分が滑らかになり、結果として変動だけでなく平均値も小さくなったと考えられる。一方、熱電対は抵抗線温度計に比べて周囲の温度変化等、環境の変化や経時変化による出力の変化が少ないので、流入風の温度や床面の温度のように変動が少ない場合の平均温度の測定に向いている。

以上のように、測定値を検討する際には測定に用いた温度計の応答特性にも十分注意しておく必要がある。本実験では上述のような温度センサーの特徴を考慮して、基準となる流入風の温度変化や、床面の温度変化の測定には熱電

対を用い、温度変化の激しい火炎後流における温度の測定には抵抗線温度計を用いることにした。

### 3. 測定結果

#### 3.1 風速による火炎の形状変化

まず、記録されたビデオ画像により風速による火炎形状の変化を調べた。火炎の形状は図 18 に示すように風速によって大きく変わり、その下流の熱流場の性状も変化する。

初め、まっすぐ立ち上っていた炎は流入風速が増加するとともに風下側に倒れ始める。図 18 a に示すように境界層上空の基準風速が  $U_0=0.35\text{m/s}$  のとき、風下側の炎の根元は床面から離れており、斜め上方に向かって炎はあがっている。炎の形状は一様ではなく、図 18 a の後方から見た図に示されるような大きな構造が見られ、風向直角横方向にゆらゆらとゆれている。炎を横から見てその形状を観察し、常に炎が見られる領域と間欠的に炎が見られる領域を図示すると、図 19 a のようになる。このとき、炎の頂上は最高約 16cm まで、風下側には最高約 9cm まで達している。

さらに風速を上げると、基準風速  $U_0$  約  $0.45\text{m/s}$  付近で炎の風下側が床面に付き始める。この風速は一定ではなく少し変動するが、図 18 b のように基準風速  $U_0=0.55\text{m/s}$  の時点では常に炎は床面に付くようになる。このとき、炎は長く風下側に伸び、伸びた 1 つ 1 つの炎の筋ははっきりとしている。横から見た炎のスケッチは図 19 b のようになり、炎の頂上は最高約 6cm まで、風下側には最高約 20cm まで達している。

風下側に伸びる炎の長さは図 18 c に示すように風速の増加とともに短くなり、また、1 つ 1 つの炎の筋は風向直角横方向に大きくゆれるようになって、それとともに 1 つ 1 つの炎の筋がはっきりとしなくなる。基準風速  $U_0=0.97\text{m/s}$  における横から見た炎のスケッチは図 19 c ようになり、炎の頂部は最高約 6cm まで、風下側には最高約 13cm まで達している。

さらに風速が増すと図 18 d のように炎の筋の揺らぎはさらに激しくなり、風下側に伸びる炎の 1 つ 1 つの筋がは

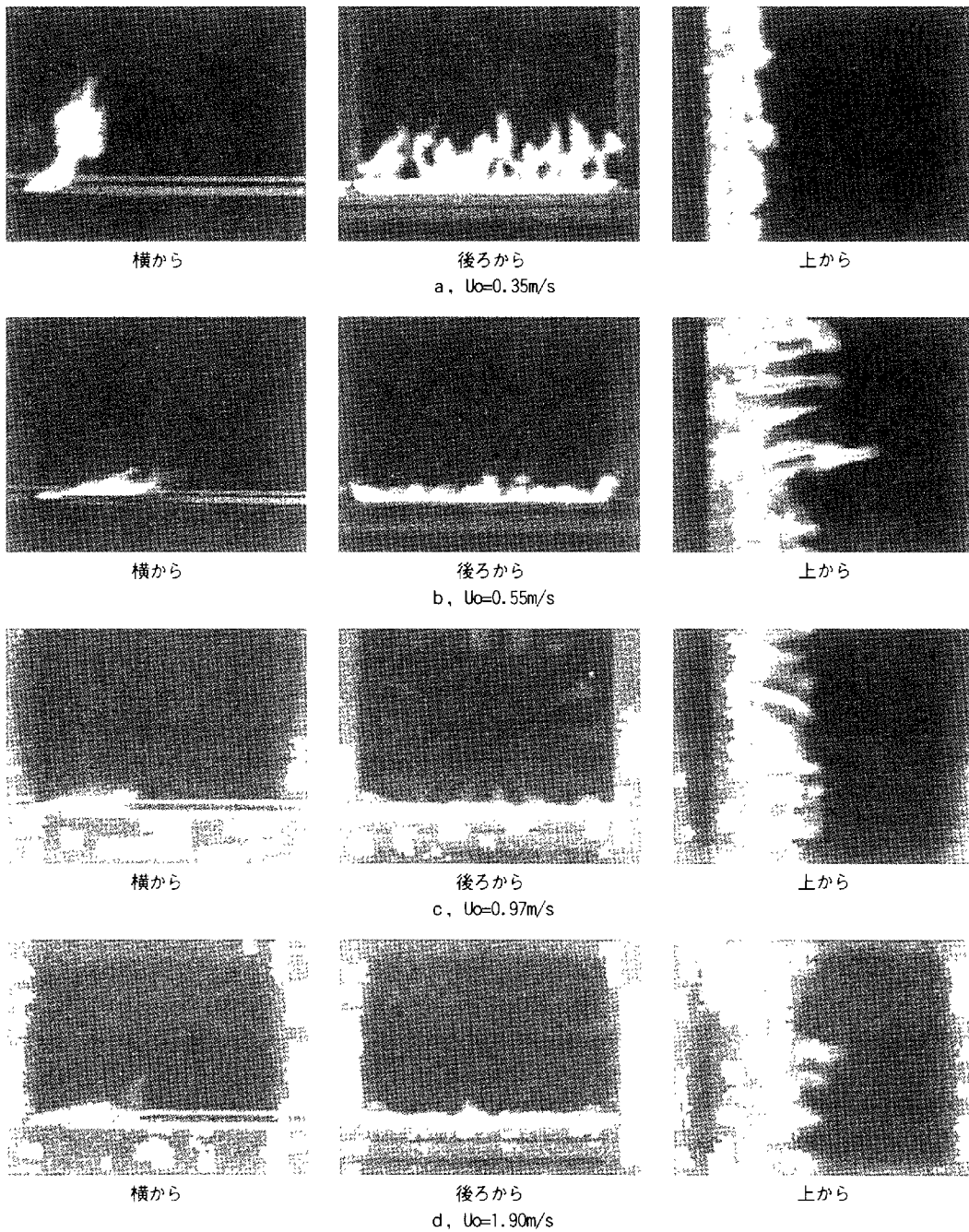


図 18 風速による火炎の形状変化

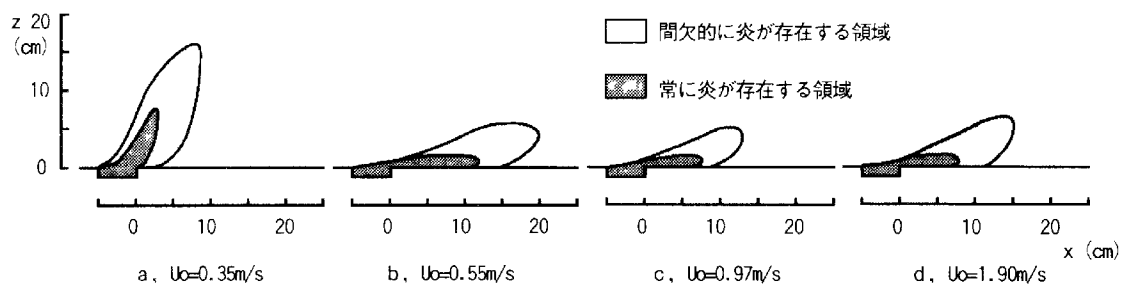


図 19 横から見た炎の形状のスケッチ

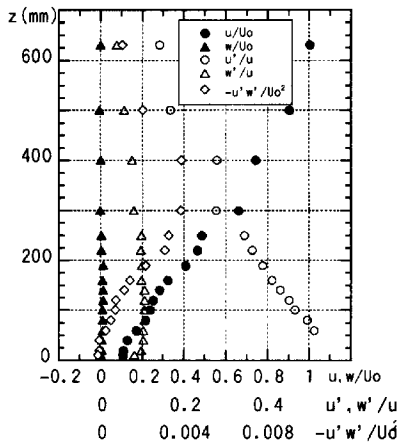
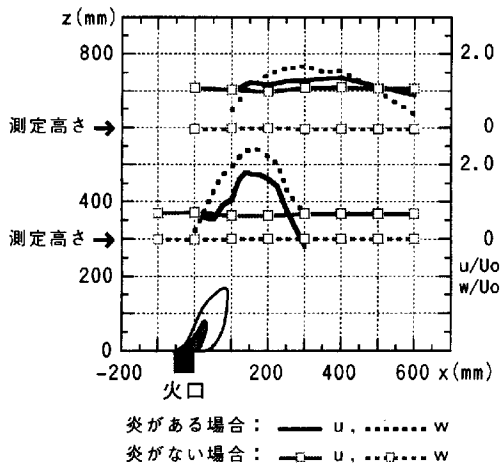
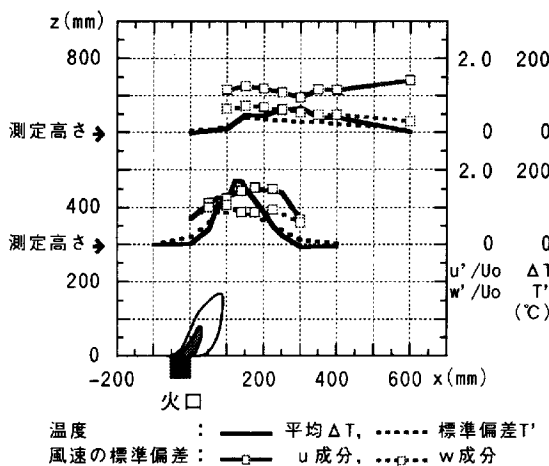


図 20 炎がないときの流入風の気流性状  
 $U_0=0.35\text{m/s}, x=0\text{m}$



a. 平均風速の水平方向分布の変化



b. 温度と風速の標準偏差の水平方向分布の変化

図 21 火炎後方の風速・温度性状の変化：  
 $U_0=0.35\text{m/s}$   
 $z=300, 600\text{mm}$ において、炎がある場合とない場合の風速および温度の水平方向の分布の変化を示す。

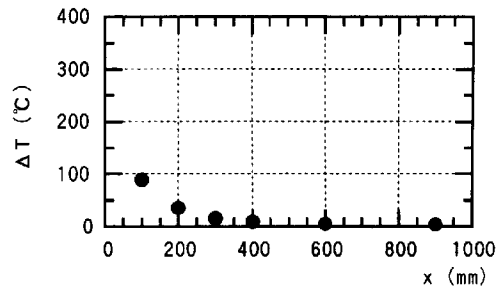


図 22 床面の温度分布  
 流入風の温度との差で示す

つきりしなくなって、全体としては風向直角横方向につながるようになる。ただし、時々大きな炎があがることもあり、炎の到達する位置は上方および後方に再び伸びる。そのため、基準風速  $U_0=1.90\text{m/s}$  における横から見た炎のスケッチは図 19d のようになり、炎の頂上は最高約 7cm まで、風下側には最高約 15cm まで達するようになる。以下、風速の増加とともに炎は風下側に少し伸びるが、特徴的な形状の変化はなかったため、今回の実験では基準風速  $U_0=1.90\text{m/s}$  までで測定を終了した。

以下に炎が床面に付く前と後、すなわち、基準風速  $U_0$  で 0.35 と 0.55 m/s の場合と、風速の増加とともに炎が再び風下に大きくなった  $U_0=1.90\text{m/s}$  の場合について、その測定結果を詳しく見てみる。

### 3.2 基準風速 $U_0=0.35\text{m/s}$ の場合

炎がない場合の火口における気流性状は図 20 に示すとおりで、境界層厚さは約 0.7m、地面付近の乱れ強さは主流方向  $u$  成分が 50% を超え、鉛直方向  $w$  成分が約 10% で、耐火チャンネル入り口から火口までの間 (約 1m) で、床面上に約 15~20cm 厚の内部境界層が発達している。なお、 $U_0=0.55$  と  $1.90\text{m/s}$  の場合に示すように流入風の気流性状は今回実験を行った範囲で風速による変化が見られた。風速・温度の同時測定の結果によると、図 21 に示すように、火炎上方で温度が上昇している部分で主流水平方向の平均風速  $u$  は炎のない場合に比べて増加しているが、風下側にいくと風速は減少し、炎のない場合よりも小さくなって、 $z=300\text{mm}$  においては  $x=300\text{mm}$  付近で平均風速  $u$  は負の値を持ち、平均的な流れは逆流していることがわかる。鉛直方向平均風速  $w$  は測定範囲ではすべて炎のない場合に比べて増加して正の値を持ち、上方に向かう流れとなっている。このとき、平均風速は  $u$  が増加しているほとんどの範囲で  $w$  成分が  $u$  成分よりも大きな値を持っている。 $u$  成分の乱れは  $w$  成分よりも大きく、平均風速が風下で減少する領域で大きくなっている。一方、 $w$  成分の乱れは平均風速が風上で増加する領域で大きくなる。

温度分布をみると、流入風の平均温度からの温度変化  $\Delta T$  の増加領域は、上方にいくにしたがって広がり、その最



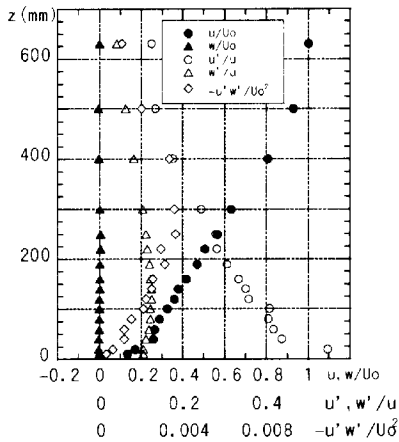
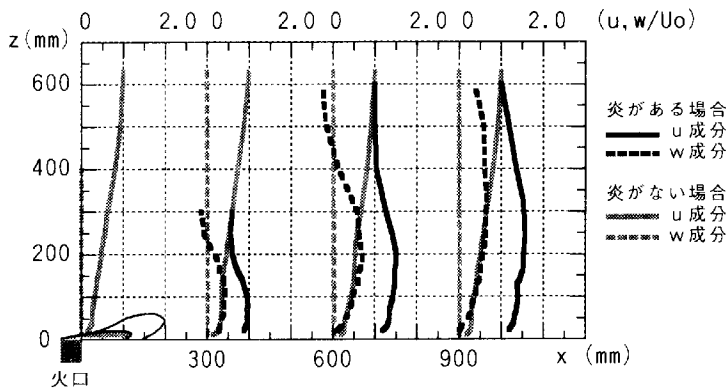


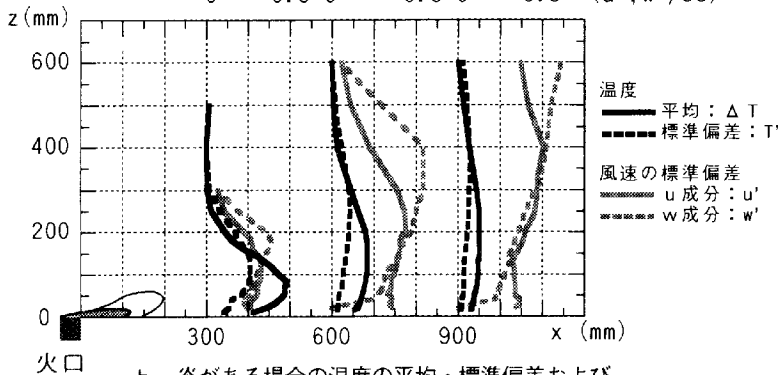
図23 炎がないときの流入風の気流性状

$U_0=0.55\text{m/s}, x=0\text{m}$



a, 平均風速の鉛直分布の変化

0 200 0 200 0 200 ( $\Delta T, T'; ^\circ\text{C}$ )  
 0 0.5 0 0.5 0 0.5 ( $u', w'/U_0$ )



b, 炎がある場合の温度の平均・標準偏差および風速の標準偏差の鉛直分布の変化

図24 火災後方の風速・温度性状の変化:  $U_0=0.55\text{m/s}$

大値をとる位置も風下側に移る。このとき、最大値はu成分の平均風速増加のピークよりも少し風上側、w成分平均風速増加のピークとほぼ同じ場所で生じている。温度の変動成分(標準偏差)  $T'$  のピークは平均風速および平均温度増加のピークの位置よりも風上側にみられる。また、風速w成分のピークの位置は温度変動のピークの位置とほぼ同じ位置に生じている。

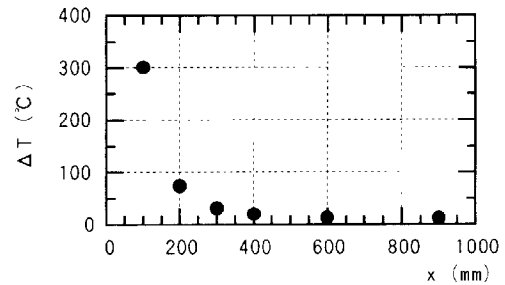


図25 床面の温度分布  
流入風の温度との差を示す

床面温度と流入風の平均温度の差  $\Delta T$  の分布は図22に示すとおりで、火口後方  $x=100\text{mm}$  で約  $90^\circ\text{C}$  となり、後方に行くにしたがって温度は下がる。なお、メチルアルコール

の消費量は火口全体で  $z=300\text{mm}$  のとき  $0.00042\text{kg/s}$ 、 $z=600\text{mm}$  のとき  $0.00036\text{kg/s}$  であった。ここで、燃料の消費量が異なるのは、実験を行った日が異なり、流入風の基準温度や火口の冷却水の温度が異なっていたためと考えられる。ちなみに、 $z=300\text{mm}$  で測定を行ったときの流入風の基準温度は  $34^\circ\text{C}$ 、火口のアルコール温度は液面下約  $10\text{mm}$  で  $65^\circ\text{C}$ 、 $z=600\text{mm}$  のときの流入風の基準温度は  $20^\circ\text{C}$ 、火口のアルコール温度は  $65^\circ\text{C}$  であった。

### 3.3 風速 $0.55\text{m/s}$ の場合

炎がない場合の火口における気流性状は図23に示すとおりで、境界層厚さは約  $0.7\text{m}$ 、地面付近の乱れ強さは主流方向u成分が約  $40\%$ 、鉛直方向w成分が約  $10\%$  で、耐火チャンネル入り口から火口までの間約  $1\text{m}$  で、床面上に約  $10\text{cm}$  厚の内部境界層が発達している。

風速・温度の同時測定の結果によると、図24に示すとおり、火災後床面付近で主流水平方向の平均風速  $u$  は火炎のない場合に比べて増加しており、後方に行くにしたがって、増加

領域は上方に広がっている。また、この増加領域にはほぼ対応して平均風速鉛直方向成分  $w$  が正になっており、上方に向かう流れとなっている。一方、増加領域のすぐ上方では  $w$  は負で、下方に向かう流れとなっている。平均風速増加のピークの高さは、w成分のほうがu成分よりも少し高い位置にある。

温度分布をみると、平均温度増加  $\Delta T$  のピークは風速増

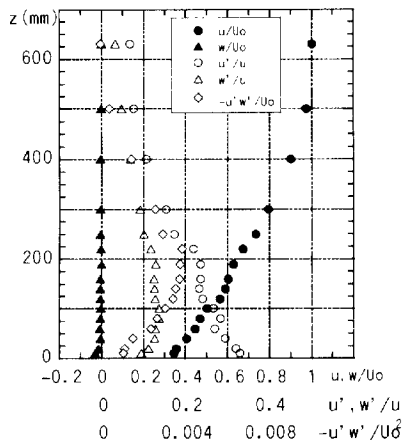
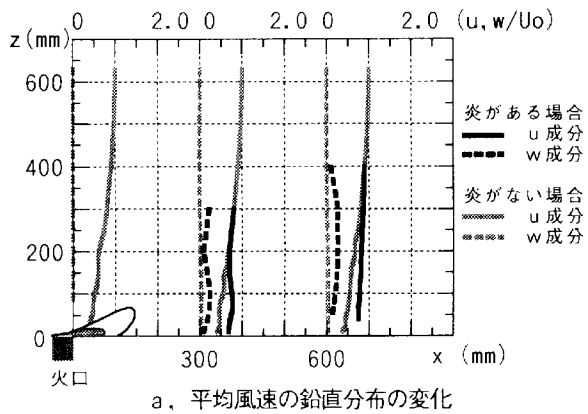
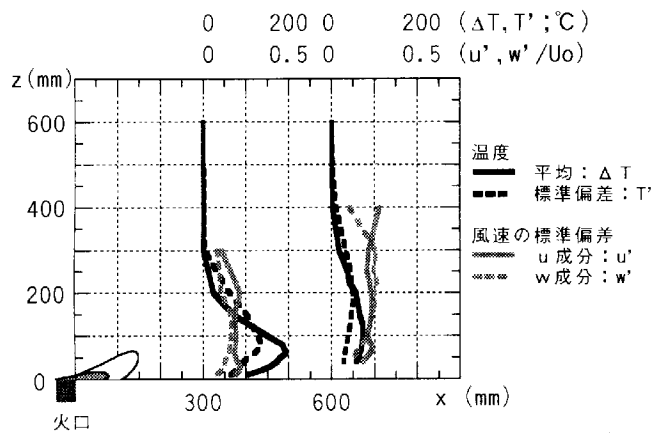


図26 炎がないときの流入風の気流性状  
 $U_0=1.90\text{m/s}, x=0\text{m}$



a. 平均風速の鉛直分布の変化



b. 炎がある場合の温度の平均・標準偏差および風速の標準偏差の鉛直分布の変化

図27 火災後方の風速・温度性状の変化:  $U_0=1.90\text{m/s}$

加のピークよりも少し下方で生じている。温度増加領域は、後方に行くにしたがって拡散し、そのピーク位置も上方に移る。温度増加の変動成分(標準偏差)  $T'$  のピークは風速および温度増加のピークの位置よりも上方にみられる。このとき、風速  $u$  成分の変動成分のピークの位置は温度変動のピークの位置とほぼ同じ高さに生じており、風速  $w$

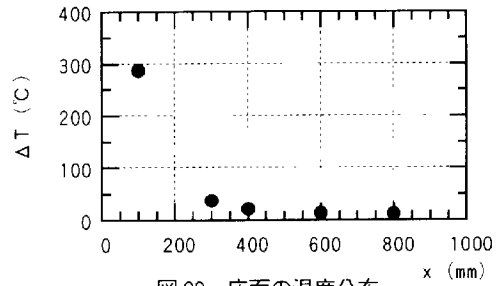


図28 床面の温度分布  
 流入風の温度との差を示す

成分の変動成分のピークはそれより高い位置にある。床面温度の分布は図25に示すとおりで、火口後方  $x=100\text{mm}$  で約  $300^\circ\text{C}$  となり、後方に行くにしたがって温度は下がる。なお、メチルアルコールの消費量は火口全体で  $0.00034\text{kg/s}$ 。また、流入風の基準温度は  $33^\circ\text{C}$ 、火口のアルコール温度は液面下約  $10\text{mm}$  で  $62^\circ\text{C}$  であった。

### 3.4 風速 $1.90\text{m/s}$ の場合

炎がない場合の火口における気流性状は図26に示すとおりで、境界層厚さは約  $0.7\text{m}$ 、地面付近の乱れ強さは主流方向  $u$  成分が約  $30\%$ 、鉛直方向  $w$  成分が約  $10\%$  で、耐火チャンネル入り口から火口までの間(約  $1\text{m}$ )で、床面上に約  $10\text{cm}$  厚の内部境界層が発達している。

風速・温度の同時測定の結果によると、図27に示すとおり、火災後方床面付近で主流水平方向の平均風速  $u$  は火炎のない場合に比べて増加しており、後方に行くにしたがって、増加領域は上方に広がっている。また、この増加領域にほぼ対応して平均風速鉛直方向成分  $w$  が正になっており、上方に向かう流れとなっている。平均風速増加のピークの高さは、 $w$  成分のほうが  $u$  成分よりも少し高い位置にある。

温度分布をみると、平均温度増加  $\Delta T$  のピークは平均風速  $u$  のピークとほぼ同じ高さで生じている。温度増加領域は、後方に行くにしたがって拡散し、そのピーク位置も上方に移る。温度増加の変動成分(標準偏差)  $T'$  のピークは風速および温度増加のピークの位置よりも上方にみられる。風速  $u$  成分の変動成分は温度増加域で高く、風速  $w$  成分の変動成分のピークの位置は温度変動のピークの位置とほぼ同じ高さに生じている。

床面温度の分布は図28に示すとおりで、火口後方  $x=100\text{mm}$  で約  $300^\circ\text{C}$  となり、 $U_0=0.55\text{m/s}$  の場合とほぼ同様な分布を示し、後方に行くにしたがって温度は下がる。なお、メチルアルコールの消費量は火口全体で  $0.00053\text{kg/s}$ 。また、流入風の基準温度は  $19^\circ\text{C}$ 、火口のアルコール温度は液面下約  $10\text{mm}$  で  $65^\circ\text{C}$  であった。

### 3. まとめ

本報では、市街地火災において上空の高温熱流場を含めた市街地火災の予測手法の確立に向けて、強風時の市街地火災における熱気流の性状を解明するための基礎データを得ることを目的に風洞実験を行った。その際、乱流境界層内における火炎後流の高温熱流場における風速と温度の同時計測を行うために以下のような計測システムを構築した。

- 1：火炎の測定は、石棉版を用いた耐火チャンネルを風洞内に設置して行い、流入風として上流側に粗度ブロックを敷き詰めて発達させた乱流境界層を用いた。
- 2：熱電対および赤外線カメラを用いて床面温度分布を測定した。
- 3：側方、後方、上方にビデオカメラを設置して炎の形状を記録した。
- 4：燃料（メタノール）の供給は、火口の燃料液面が一定になるように供給し、燃料消費量は燃料タンクの重さの変化により求めた。
- 5：耐熱性のトレーサである酸化チタンを用い、レーザードップラー流速計を用いて風速の測定を行った。
- 6：耐熱性の抵抗線温度センサーを用いて、炎の下流の温度変動を測定した。その際、レーザードップラー流速計による風速測定との同時測定が可能にようにした。

以上のような計測システムを用いて測定を行い、流入風速の変化によって、炎の形状や風下側の高温熱流場における風速・温度の性状を明らかにした。

今後、これらのデータは、有風時の火炎後方の延焼性状の解明と高温熱流場の予測手法の確立に向けての基礎資料として活用する予定である。

### 謝 辞

実験手法に関して、国立環境研究所の上原清氏、九州大学応用力学研究所の大屋裕二教授から有益な助言を頂いた。ここに記して謝辞を表す。また、本研究は文部科学省科学研究費補助金の助成を受けて行われたものである。

### 参考文献

- 1) 佐賀武司, 日本火災学会論文集, 1997, Vol. 49, No. 1・2, pp. 1-12.
- 2) 木下拓也他, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000, pp. 195-198.

## Experimental study on the high temperature wind characteristics behind a 2D flame in the turbulent boundary layer

MARUYAMA / Takashi, Tanaka / Takeyoshi

### Synopsis

A series of wind tunnel experiment has been carried out to investigate the high temperature wind characteristics behind a two-dimensional fire flame in the turbulent boundary layer. The simultaneous measurement of the temperature and the wind velocity has been done. The configuration of the fire and the temperature distribution on the wall was recorded by the video camera. The characteristics of the temperature and the wind field behind the fire was studied using these experimental data.

**Keywords:** flam; high temperature wind; wind and temperature characteristics; turbulent boundary layer, wind tunnel experiment