天井面下の熱気流温度に基づく火点検知手法に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PREDICTING METHOD OF FIRE LOCATION BASED ON CEILING JET TEMPERATURE UNDER UNCONFINED CEILING

新田 孝太郎*, 山口 純一**, 岡 泰資***, 村岡 宏****

*Kotaro NITTA, Jun-ichi YAMAGUCHI, Yasushi OKA
and Ko MURAOKA*

There is a possibility that an unexpected long time is required to identify the fire occurrence location in a room with obstruction of visibility by the smoke, distributed exhibit cases and production machines, such as in the factory where the floor space is extremely large and in the merchandize shops where various goods are exhibited. It is believed that identification of the fire occurrence location in the early stage of the fire makes the fire fighting more effective. For this purpose, a new algorithm for estimating the fire occurrence location and the heat release rate, is developed by transforming Alpert's equation, namely with the aid of the temperature decreasing property of the ceiling jet formed under the unconfined ceiling in a quasi-steady state. Compared with the experimental results, this proposed method is found sensitive to the number and installation interval of sensors used for the calculation and fluctuation of temperature data.

Keywords : *Ceiling-Jet, Fire Location, Unconfined Ceiling, Heat Release Rate*

天井流, 火点, 無限天井, 発熱速度

1. はじめに

建築物の火災安全対策の主な目的は, 人命安全の確保, 財産の保護, 消防活動の支援である¹⁾。このうちの消防活動の支援に着目すると, 通常消防隊は建物外部から火点にアクセスし, 状況に応じて消火・救助活動を行なう。消防活動を安全かつ確に行うには, 活動拠点の確保や消防設備の効果的な利用に加えて, 現在の火点の位置やその状況といった火災情報の提供も重要である。特に室の床面積が数千㎡以上にもなる大規模物販店舗や製造工場等では, 商品陳列棚や製作機械等の過密配置による見通しへの障害や火災により発生した煙による見通し距離の低下により, 消防隊の火点へのアクセスの遅れによる被害の拡大や, 消防隊自身が危険に曝される可能性が高まることも考えられる。

現在, 消防隊に火災情報を提供するものとして自動火災報知システムがある。自動火災報知システムは天井面下に設置された感知器からの信号をもとに出火区域を把握するものであるが, 詳細な火点位置や時々刻々と変化する火災の進展状況を分析する機能までは備えていない。そこで, 感知器等から得られる情報を分析することで火点位置や火源規模を特定し, リアルタイムでその情報を伝達できれば, 火災による被害を拡大させず局所化できると考えられる。

本研究は, 火災時における火点検知に関わる基礎的研究として, 水平で平らな天井下に配置された複数の感知器等の温度センサからの情報に基づく火点検知手法を考案するとともに, 火災が天井に接炎する以前の火災の熱気流性状を再現した燃焼実験結果を用いて, 火点検知手法の妥当性の検討を行うことを目的とする。

2. 火点位置検知手法

平面的に大きな空間で火災が発生した場合, 火災初期における天井下の熱気流(以降, 天井流と言う。)の温度性状は, 周壁の影響を受けることのない無限天井下のそれに近い性状を示すと考えられる。そこで, 本研究では無限天井下における天井流の温度減衰式をもとにした火点検知手法を提案する。

2.1 基本的な考え方

天井流の温度は, 火源中心軸からある任意の位置までの距離(以降, 流動距離と言う。)に応じて減衰する。水平な天井面に設置された複数の温度センサと火源との関係を見た場合, 火源規模の大小にかかわらず, ある時刻における発熱速度, 火源から天井までの高さは何れの温度センサに対しても同条件である。そのため, 各温度セ

* 横浜国立大学大学院環境情報学府

** 榊大林組技術研究所 工修

*** 横浜国立大学大学院環境情報学研究院 博士(工学)

**** 榊大林組技術研究所 博士(工学)

Yokohama National University

Technical Research Institute, Obayashi Corporation, M. Eng.

Yokohama National University, Dr. Eng.

Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

センサの近傍における天井流温度は流動距離のみに依存することになる。そこで複数の温度センサから得られた温度情報とそれぞれの流動距離の関係を相互に比較することにより、火点位置を推測するのが基本的な考え方である。これは、地震発生直後に震源に近い観測点で得られた地震波データ（P波もしくはS波）から、震源情報（震源地、地震の規模）を推定するのと同様の考え方である。

2.2 本研究で用いた火点検知方法

実際に天井下に温度センサを設置することを想定した場合、温度センサを格子状に配置することが多いであろう。しかし、本研究では不具合等によって部分的に使用できない温度センサが生じる可能性を考慮して、温度センサがランダムに設置された場合に対応した火点検知手法を検討することとした。

2.2.1 天井流の基本性状

Alpert²⁾は次元解析および水平無限天井空間において火源から天井までの高さ4.6~15.5m、発熱速度0.67~98MWの火源を用いた実大規模の実験を行い、天井面下の熱気流の温度について

$$\Delta T = 5.38 \frac{\dot{Q}_f^{2/3} / H^{5/3}}{(r/H)^{2/3}} \quad \left(0.18 < \frac{r}{H} < 4 \right) \quad (1)$$

の関係式を提案した。ここで ΔT は位置 r における熱気流の周囲空気温度からの温度上昇[K]、 r は火源中心軸からの流動距離[m]、 H は火源から天井までの高さ[m]、 $\dot{Q}_f$ は火源発熱速度[kW]である。なお、 $r/H \leq 0.18$ の範囲はよどみ領域と呼ばれており、本研究の対象外とした。

また、式(1)を火災安全工学の分野でよく使用される無次元発熱速度 Q^* [-]

$$Q^* = \frac{\dot{Q}_f}{\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2} H^{5/2}} \quad (2)$$

および無次元温度上昇 ΔT^* [-]

$$\Delta T^* = \frac{(\Delta T / T_\infty)}{Q^{*2/3}} \quad (3)$$

を用いて整理すると式(4)のようになる。

$$\Delta T^* = 5.38 \frac{(\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2})^{2/3}}{T_\infty} \left(\frac{r}{H} \right)^{-2/3} \quad \left(0.18 < \frac{r}{H} < 4 \right) \quad (4)$$

ここで、 ρ_∞ は空気密度[kg/m³]、 C_p は空気の比熱[kJ/(kg·K)]、 T_∞ は周囲空気温度[K]、 g は重力加速度[m/s²]である。なお、以下では r/H を無次元流動距離[-]と呼ぶこととする。

2.2.2 天井流温度と減衰距離の関係

図1は3つの温度センサからの温度情報を基に火点を特定する方法を説明するための概念図である。ここで (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) は、それぞれ温度センサ1, 2, 3の設置座標、 ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 はそれぞれ温度センサ1, 2, 3の温度上昇、 r_1 、 r_2 、 r_3 は火災ブルームが水平天井に衝突した位置（火点中心座標 (x_f, y_f) ）から温度センサ1, 2, 3までの距離である。なお、本研究では火源から天井までの高さ H の代わりに、

図1 火点位置検知の概念図

火皿下端から天井までの高さ H_{fc} を用いている。

天井流が生じると、各温度センサからの温度情報が逐次得られる。天井流の温度上昇は、式(1)より、 $\dot{Q}_f$ 、 H_{fc} 、 r を変数とした累乗の関数で表せる。しかし、天井材の種類、表面状態、形状等によっても天井流の温度性状が変わることが予想されるため、本研究においては式(1)を幾分一般化して、下式のように表せると考えた。

$$\Delta T = k \dot{Q}_f^\alpha H_{fc}^\beta r^\gamma \quad (a < r/H_{fc} < b) \quad (5)$$

ここで、 k 、 α 、 β 及び γ は温度センサが設置された天井材の種類、表面状態、形状等によって変化する定数である。また、 a および b は式(5)の無次元流動距離に対する適用範囲の下限値および上限値である。

温度センサ1の温度 ΔT_1 は、式(5)より、

$$\Delta T_1 = k \dot{Q}_f^\alpha H_{fc}^\beta r_1^\gamma \quad (6)$$

と表せる。火点位置は不明であるが、火点中心座標 (x_f, y_f) から温度センサ1 (x_1, y_1) までの距離 r_1 は、

$$r_1 = \sqrt{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2} \quad (7)$$

となる。これを式(6)に再代入すると、

$$\Delta T_1 = k \dot{Q}_f^\alpha H_{fc}^\beta \left\{ \sqrt{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2} \right\}^\gamma \quad (8)$$

を得る。また、温度センサ2の温度上昇 ΔT_2 は、同様に

$$\Delta T_2 = k \dot{Q}_f^\alpha H_{fc}^\beta \left\{ \sqrt{(x_2 - x_f)^2 + (y_2 - y_f)^2} \right\}^\gamma \quad (9)$$

となる。

天井面に設置される温度センサの個数は、できる限り少ない方が経済的に有利であるため、限られた温度情報の中で検知精度を向上させるには、 $\dot{Q}_f$ や H_{fc} などの未知数はない方が好ましい。そこで本研究では、式(8)と式(9)の比をとり、火点中心座標である x_f および y_f のみを未知数とした

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\left\{ \sqrt{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2} \right\}^\gamma}{\left\{ \sqrt{(x_2 - x_f)^2 + (y_2 - y_f)^2} \right\}^\gamma} \quad (10)$$

なる関係式を用いることとした。

同様に、温度センサ2の温度上昇 ΔT_2 と温度センサ3の温度上昇 ΔT_3 の比をとると、

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_3} = \frac{\left\{ \sqrt{(x_2 - x_f)^2 + (y_2 - y_f)^2} \right\}^\gamma}{\left\{ \sqrt{(x_3 - x_f)^2 + (y_3 - y_f)^2} \right\}^\gamma} \quad (11)$$

となる。従って、式(10)および式(11)を同時に満足するような火点座標 (x_f, y_f) を検索すれば、 $\dot{Q}_f$ や H_{fc} が未知であっても火点位置を特定できる。なお、火点位置を検知するには最低3つの温度センサから得られる温度情報と設置位置座標が必要であると言える¹⁾。

2.2.3 走査座標を用いる方法

実際には、式(10)および式(11)を同時に満足するような火点座標をピンポイントで特定することは難しい。そこで、式(10)および式(11)における火点座標 (x_f, y_f) の代わりに走査用の座標 (x_s, y_s) を用い、これを移動させながら式(10)および式(11)を同時に満足する座標を検索するのが実用的な方法である。

図2は、火点の走査方法を説明するために走査範囲を $n \times m$ 個のグリッドに分割した例で、図1に示した火点中心座標および温度センサ座標を平面的に示している。なお、 x 軸方向のグリッド間隔は dx 、 y 軸方向のグリッド間隔は dy である。操作方は以下の通り。

まず各温度センサから温度 $(\Delta T_1, \Delta T_2$ および $\Delta T_3)$ を得る。つぎに走査座標 (x_s, y_s) を走査原点 (x_0, y_0) から順次、 dx もしくは dy ずつ移動する。その都度、式(10)および式(11)を同時に満足するかどうかを判定し、両式を同時に満足した時点で走査を終了し、その時の走査座標を火点とする。

図2 火点の走査方法

2.2.4 残差Rの最小値から推定する方法

前述した火点位置の推定方法は、式(10)および式(11)もしくは両式の基となる式(5)と、実際の天井流の温度減衰が一致していることを前提としている。しかし、両者がどのような状況においても常に一致するとは限らない。そのため本研究では、式(10)および式(11)それぞれについて右辺と左辺の差をとり、両者の絶対値の総和を残差Rとし、この値が最小値を示す走査座標を火点と判断することとした。ここで残差Rは、式(10)および式(11)から

$$R(x_s, y_s) = \left| \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} - \frac{\sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2}} \right| + \left| \frac{\Delta T_2}{\Delta T_3} - \frac{\sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2}} \right| \quad (12)$$

となる。なお、式(12)では、式(10)および式(11)における火点 (x_f, y_f) を走査座標 (x_s, y_s) に変更して表現している。

3 実験概要

3.1 実験装置

実験に使用した模擬無限天井の大きさは8.5m(W)×5.8m(L)で、仮想床から3mの高さに水平に設置した。この模擬無限天井は厚さ12mmの合板下地に9.5mmの石膏ボードで構成されている。本実験では天井流の基本的な性状を把握することを目的としていることから、実験装置の側面に壁は設置していない。またこの実験装置は28.8m(W)×17.1m(L)×11.1m(H)の吹抜空間の中に設置した。

3.2 測定項目

1)温度

図3に温度の測定位置を示したように、素線径0.32mmのK型熱電対を天井面から鉛直下方に5cm²⁾の高さの水平面上に、天井の中心を起点として1m間隔で格子状に45点設置し、データロガーを介して1秒間隔で温度を測定した。

図3 熱電対配置図(平面図)

2)燃料の重量減少速度

火源の発熱速度を把握するために燃料の重量減少を重量計(ザルトリウス社製, LP64401S)で測定した。秤量天板の保護板として厚さ0.6m×0.6m×0.05mのケイ酸カルシウム板を設置して、その上に燃料を投入するための円形火皿を設置した。その結果、円形火皿の下端(ケイ酸カルシウム板の上面)は(仮想)床面から19cmの高さに位置している。

火源発熱速度は燃料の重量減少速度とその理論発熱量から算出した。なお、本研究で燃料として使用したメタノールの理論発熱量は19,830 kJ/kgである。

3.3 実験条件

表1に火皿下端から天井までの高さおよび火源規模を変化させて実施した12ケースの実験条件を示す。なお、火源中心は何れのケースにおいても図3の $(x, y)=(3, 3)$ の位置とした。

1) 天井高さ

高さ調節機構の付いた仮設ステージ上に火源を設置することによって、火皿下端から天井までの高さを2.81m, 2.17m, 1.56mおよび0.94mの4段階に変化させた。

2) 火源発熱速度

円形火皿の大きさを変えることで火源の発熱速度を調節した。燃料火皿はいずれも深さ4cmのものを使用し、直径0.2m, 0.3m, 0.4mおよび0.6mの4種類の中から、模擬無限天井に接炎しないように天井高さに応じて3種類を選択して使用した。

表1 実験条件

No	天井高さ H_{fc} [m]	火源直径 [m]	温度測定範囲
1	2.81	$\phi 0.2$	$0.36 \leq r/H_{fc} \leq 2.3$
2		$\phi 0.4$	
3		$\phi 0.6$	
4	2.17	$\phi 0.2$	$0.46 \leq r/H_{fc} \leq 2.9$
5		$\phi 0.4$	
6		$\phi 0.6$	
7	1.56	$\phi 0.2$	$0.64 \leq r/H_{fc} \leq 4.1$
8		$\phi 0.4$	
9		$\phi 0.6$	
10	0.94	$\phi 0.2$	$1.1 \leq r/H_{fc} \leq 6.7$
11		$\phi 0.3$	
12		$\phi 0.4$	

4. 実験結果

4.1 火源発熱速度と各位置の温度

図4に実験条件No.1, 2, 3および11（火皿径は順に0.2, 0.4, 0.6, 0.3m）における重量減少速度から算出した火源発熱速度の時間変化を示す。

これより、何れの条件でも発熱速度は、着火直後に急激に上昇し、それ以降は緩やかな上昇傾向にあるが準定常的に燃焼しているといえる。なお、それぞれの実験条件における200～300秒の平均発熱速度は火皿径0.2mでは8.3kW、火皿径0.3mでは20kW、火皿径0.4mでは40kW、火皿径0.6mでは93kWであった。

図4 火源発熱速度の時間変化

図5は、実験条件No.2 ($H_{fc}=2.81$ m, 火皿径0.4m) における、測定点座標(4,3), (5,3), (6,3), (7,3), (8,3)および(9,3)の天井流温度の時間変化を示したものである。

図5より、各位置の温度は熱気流の波に応答し、細かく振動していることが分かる。しかし、大きな傾向としては火点(3,3)に近い位置の天井流温度は高く、火点から遠ざかるに従い温度は低くなる。また、測定点が火点から遠ざかるに従い着火後の温度上昇の立ち上がりが遅れている。この時間差は着火直後の熱気流が各測定点に到達するまでに要する時間であり、出火直後の火点検知精度に大きな影響を及ぼす可能性がある。

図5 各測定点における温度の時間変化

図6に、実験条件No.2で得られた温度データ（準定常的に燃焼している燃焼開始後120秒における瞬間値）を基に作成した等温度線図を示す。ここでx軸の数値は各測定点のx座標を、y軸の数値は各測定点のy座標を意味し、座標間隔はx軸、y軸ともに1mである。

これより天井流は火点(3,3)を中心とする同心円状に拡がるのが分かる。このような緻密な等温度線図が得られれば、特殊な手法を用いることなく容易に火点を推定できる。

図6 全測定点の120秒時点における温度を基に作図した等温度線図（等温度線間隔2.5[°C]）

一方、図7は、図6で用いた温度のうち座標(2,1), (5,1), (2,4)および(5,4)の4点の温度情報を基に作成した等温度線図である。

図7より、4点の温度情報を基に作図した等温度線図からは火点を推定することは難しいことが分かる。実際の建築空間では火災感知器は7～9m間隔に不等間隔に配置されるのが一般的であり、図6のような詳細な分布を得ることは期待できない。そのため、先に示した火点位置検知手法が有効になるのである。

図7 (2,1), (5,1), (2,4), (5,4)の120秒時点における温度を
基に作図した等温度線図(等温度線間隔2.5[°C])

4.2 天井流の温度減衰性状

図8は、天井5cmにおける天井流の温度を式(3)で定義される無次元温度上昇 ΔT^* に変換し、無次元流動距離 r/H_{fc} に対してプロットした結果である。なお図8に用いた温度は、各実験条件において発熱速度が準定常状態である燃焼開始後200~300秒の平均値を用いた。

図8 無次元温度上昇の減衰性状

図8より、 $0.36 \leq r/H_{fc} \leq 5.0$ の範囲にあつては、無次元温度上昇 ΔT^* は、無次元流動距離 r/H_{fc} に対して概ね一定の減衰率を保持して温度が低下することが分かる。また、前述の範囲において無次元温度上昇 ΔT^* を無次元流動距離 r/H_{fc} に対して回帰した結果、

$$\Delta T^* = 2.03(r/H_{fc})^{-0.81} \quad (13)$$

を得た²³⁾。ここで、式(13)は無次元変数で表現されているが、火点検知に使用する場合は有次元で表現した方が扱いやすい。そこで式(13)に式(2)と式(3)を代入して、温度上昇 ΔT に対して整理すると式(14)が得られる。

$$\Delta T = k \dot{Q}_f^{0.67} H_{fc}^{(0.81-5/3)} r^{-0.81} \quad (14)$$

$$\left(\text{ただし } k = \frac{2.03 T_\infty}{(C_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2})^{2/3}} \right)$$

なお、後述の火点位置検知結果は、式(12)の γ として、実験から得られたべき乗数(-0.81)を用いている。

5. 火点位置検知に関する検討

5.1 温度のサンプリング方法と検知精度の関係

図9は、実験条件No.2において、座標(5,3)における着火後120~150秒間の温度履歴を示したものである。火点検知に用いる温度データとしては、生データ(図中●)をそのまま使用する方法と、破線および実線で示したように生データのある時間蓄積し、その時間の平均値を使用する方法が考えられる。図9から分かるように生データは小刻みに変動しており、今回検証するような準定常火源では、できるだけ平均時間を長くした方が検知精度は向上すると思われる。しかし、平均時間が長くなると非定常火源や火点の移動といった急に火災性状が変化する場合に対応できなくなる恐れがあるため、平均時間はある程度の検知精度が得られる範囲内で短い方がよいと考えられる。

図9 測定温度のサンプリング方法

図10は、実験No.2において座標(1,1)、(5,1)および(5,5)の温度センサから1秒毎に得られる温度情報を基に火点を推定し、その結果を座標上に1秒毎に示した結果である。なお、各温度センサの温度上昇が認められた着火5秒後から火点検知が始まっている。また図10には実際の火点座標(3,3)と検知に用いた温度センサの座標も合わせて表示した。

図10より、検知した火点は着火後5秒から120秒までの間は大きく変動し火点を特定するには至っていない。しかし、121秒以降では検知された火点は実際の火点位置に近いことが分かる。

実際の火点と推定した火点との距離を誤差とし、検知誤差を定量的に把握するために式(15)を用いて平均誤差 $\bar{E}$ を算出した。

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{f(s)}^i - x_f)^2 + (y_{f(s)}^i - y_f)^2}}{N} \quad (15)$$

ここで、 N は総検知回数、 $x_{f(s)}^i$ 、 $y_{f(s)}^i$ はそれぞれ検知開始から i 回目に検知された火点の x 座標、 y 座標である。式(15)に従い図10に示した検知結果の平均誤差を算出したところ、5~120秒の平均誤差は1.0m、121~210秒の平均誤差は0.47m、5~210秒の平均誤差は0.76mであった。

図10 3点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径 0.4m, $H_f=2.81$ m, 温度平均時間 1s)

図11は、実験No.2において図10と同じ座標 (1,1), (5,1) および (5,5) の温度センサから得られる温度情報を15s, 30s, 60sとある時間蓄積し (以後、温度平均時間と言う。), その間の平均値を用いて火点検知した結果を示した結果である。なお、温度平均時間が15sの場合、着火から15秒間は温度情報を蓄積するため、検知を開始するのは15秒以降となる。同様に温度平均時間が30sの場合は30秒以降、60sの場合は60秒以降に検知を開始している。またそれぞれの検知結果は、検知が開始された時点から着火後210秒までを示している。

図11より、生の温度データを用いた図10の場合と比較すると何れの温度平均時間の場合においても格段に検知精度が向上することがわかる。これは図9に示したように、1秒毎に得られる温度のゆらぎの影響が、平均温度を用いたことで緩和されたからである。なお、この時の60~210秒の平均誤差は温度平均時間が15sでは0.48m, 30sでは0.44m, 60sでは0.40mであった。以上より、準定常状態の火源においては温度平均時間を長くすると検知精度は向上するといえる。

図11 温度平均時間と検知精度の関係
(火皿径 0.4m, $H_f=2.81$ m, 温度センサ 3点)

5.2 温度センサ設置間隔と検知精度の関係

図12は、実験No.2において、座標 (1,1), (9,1) および (9,5) の温度センサから1秒毎に得られる温度情報を30秒間蓄積し、その30秒間の平均温度を基に火点を推定した結果である。

図12より、図11の温度センサ設置間隔が小さい場合と比較して検知精度が大幅に低下していることが分かる。特に30~180秒の検知精度の悪化が著しい。一方で、181秒以降の検知精度は比較的良いことが分かる。この検知精度の違いは、火点から遠い温度センサ (9,1) もしくは (9,5) までの天井流の到達遅れ時間の影響が小さくなった

ことが原因と考えられる。また30~210秒の平均誤差は1.81mであった。これより温度センサの設置間隔を大きくすると検知精度が大きく低下するため、実用化に際しては必要な検知精度が得られるように温度センサの設置間隔を決定することが必要となる。

図12 3点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径 0.4m, $H_f=2.81$ m, 温度平均時間 30s)

5.3 温度センサ個数と検知精度の関係

実験条件 (No.2) や温度平均時間 (30 秒) は図12と同じであるが、座標 (1,1), (9,1), (9,5)に加えて(1,5)の4点の温度センサからの温度情報を基に火点を推定した結果を図13に示す。なお、4つの温度情報を用いて火点検知する場合は、式(12)の右辺に3番目と4番目の温度センサから得られる温度および位置情報から算出される項を加え、残差 R を下式により算出した。

$$R(x_s, y_s) = \left| \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} - \frac{\left\{ \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \right\}^\gamma}{\left\{ \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2} \right\}^\gamma} \right| + \left| \frac{\Delta T_2}{\Delta T_3} - \frac{\left\{ \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2} \right\}^\gamma}{\left\{ \sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2} \right\}^\gamma} \right| + \left| \frac{\Delta T_3}{\Delta T_4} - \frac{\left\{ \sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2} \right\}^\gamma}{\left\{ \sqrt{(x_4 - x_s)^2 + (y_4 - y_s)^2} \right\}^\gamma} \right| \quad (16)$$

図13より、4つの温度センサを用いて検知する場合 (以後、4点検知と言う。) は、3つの温度センサを用いて検知する場合 (以後、3点検知と言う。) と比較して検知精度が大幅に向上していることが分かる。特に、3点検知では精度の悪かった60~180秒で顕著な改善が見られる。なお、30~60秒の検知精度が悪いのは、図5に示し

図13 4点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径 0.4m, $H_f=2.81$ m, 温度平均時間 30s)

たように火点から遠い位置にある温度センサ(座標(9,1)および(9,5))への天井流の到着遅れが主な原因と考えられる。

図14は、表1に示す全ての実験条件に対して3点検知と4点検知のそれぞれの場合の平均誤差の算出結果である。なお、3点検知は座標(1,1)、(9,1)および(9,5)の温度情報を、4点検知は座標(1,1)、(9,1)、(9,5)および(1,5)の温度情報を用いた。また、温度平均時間はどのケースも30秒である。

図14より、火皿下端から天井までの高さが0.94mのケース(No.10~12)では温度センサ個数を変化させても精度向上が見られないものの、他のケースでは平均誤差が1/2~1/3程度となり、検知精度の大幅な向上が見られる。これより高い検知精度が必要とされる場合は4点以上の温度情報を用いて検知することが必要と言える。なお、火皿下端から天井までの高さが0.94mのケースにおいて3点検知と4点検知との結果に大きな違いが見られなかった原因については、次の5.4火皿下端から天井までの高さとの関係にて説明する。

図14 温度センサ個数と平均誤差(30~210秒)の関係

5.4 火皿下端から天井までの高さとの関係

先に示した図14において、火皿下端から天井までの高さ H_f と検知精度の関係に着目すると、4点検知の場合、火皿下端から天井までの高さが1.56m、2.17mおよび2.81mの条件下では火皿下端から天井までの高さとの間に相関は見られないが、火皿下端から天井までの高さが0.94mの場合は他の場合と比較して検知精度が極端に悪くなっている。これは火皿下端から天井までの高さが0.94mの場合、火点(3,3)から遠い位置にある温度センサ(9,1) (もしくは(9,5))の無次元流動距離が $r/H_f = 6.7$ となっており、検知手法の基となる式(14)の適用範囲 ($0.36 \leq r/H_f \leq 5.0$) を超えていることが要因と考えられる。一方、3点検知の場合は火皿下端から天井までの高さに対する検知精度の依存性は見られない。これは、検知手法の適用範囲を超えることに対する誤差よりも天井流の流動距離に対する減衰率が完全な同心円状にならない(図6参照)ことに起因する誤差が大きく影響していると思われる。以上より、火点検知は4点検知を基本とし、さらに温度減衰式の適用範囲および天井高さに応じて温度センサの設置間隔を見直すことが必要といえる。

5.5 火源規模と検知精度の関係

図14において、火源規模と検知精度の関係に着目すると、4点検知の場合、火皿直径が0.2mから0.4m (もしくは0.3m)に変化しても検知精度の向上が見られるが、火源直径が0.4mから0.6mに変化しても検知精度に有意な差は確認できない。一方、3点検知では火皿下端から天井までの高さが1.56mの場合に火皿直径が0.2mから0.4mに変化したとき検知精度の向上が見られるものの、他の火皿下端から天井までの高さにおいては火皿直径による検知精度の変化はあまり見られない。

以上より、4点検知の場合においては火皿直径0.2m (8.3kW) のように火源発熱速度が小さいと検知精度が幾分悪くなる傾向があるが、ある程度以上の火源発熱速度 (本実験結果では40kW以上) においては、火源発熱速度に対する依存性は小さいと考えられる。

6. 火源発熱速度の推定

6.1 火源発熱速度の推定方法

火点が特定できると、任意の温度センサ i から得られた温度 ΔT_i と火点と温度センサまでの流動距離 r_i を用いて、原理的には式(14)を火源発熱速度 $\dot{Q}_f$ について解いた式(17)から火源の発熱速度を推定することができる。

$$\dot{Q}_f = \left(\frac{\Delta T_i}{k H_f^{(0.81-5/3)} r_i^{-0.81}} \right)^{3/2} \quad (17)$$

ここで、 k は、

$$k = \frac{2.03 T_\infty}{(C_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2})^{2/3}} \quad (18)$$

で表される比例定数である。これに、雰囲気温度 T_∞ ($=293\text{K}$)、雰囲気密度 ρ_∞ ($=1.2\text{kg/m}^3$)、定圧比熱 C_p ($=1.0\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$) および重力加速度 g ($=9.8\text{m/s}^2$) を代入すると、

$$k = 5.6 \text{ [m}^{5/3}\text{K/kW}^{2/3}\text{]} \quad (19)$$

を得る。

温度上昇 ΔT_i は、複数の温度センサのうちの1つを選択し、その温度センサから得られる値を使用する。また流動距離 r_i は、選択した温度センサ i の設置座標 (x_i, y_i) と火点検知の結果より得られた火点座標 (x_f, y_f) から、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2} \quad (20)$$

により算出する。

ここで、式(17)における H_f は火皿下端から天井までの高さである。本研究で提案した火点検知手法では火点位置を推定することができるが火皿下端から天井までの高さを知ることはできない。しかし、火皿下端から天井までの高さ H_f の代わりに床面から天井までの高さ H_c を採れば火源発熱速度を大きめに見積もることになるため、結果としては安全側の推定となる^(注4)。

6.2 火源発熱速度の推定結果

図15は、実験No.2において、座標(1,1)、(9,1)、(1,5)および(9,5)の4つの温度センサから1秒毎に得られる温度情報を30秒間蓄積し、その30秒間の平均温度を基に火点を推定した結果(図13参照)を使い、

座標(9,5)の温度情報を基に火源発熱速度を推定した結果である。なお、ここでは $H_f = H_c = 2.81\text{m}$ とした。

図15より、300秒以降になると推定値の方が実測値より大きな値を示しているが、実測値と推定値は良く一致しており、比較的良好な結果を示していると言える。これより火皿下端から天井までの高さ H_f の見積には課題が残るが、火点位置が特定できれば火源発熱速度を推定することも可能であることが分かる。

図 15 発熱速度の時間変化
(火皿径 0.4m, $H_f = 2.81\text{m}$, 温度平均時間 30s)

7. まとめと今後の課題

天井面下に設置された複数の温度センサから得られる温度情報を基に火点を検知する手法を開発することを目的として実験的研究を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 火源発熱速度 $\dot{Q}_f$, 火皿下端から天井までの高さ H_f が未知でも温度センサからの温度情報を基に火点検知を行う手法を提案した。
- (2) 温度情報のある一定時間蓄積し、その平均温度を用いると検知精度が向上する。
- (3) 温度センサ数を3個から4個に増やすことで誤差(実際の火点位置と検知位置との距離)が約1/2となる。
- (4) ある程度の火源発熱速度以上(今回は40kW以上)においては、火源発熱速度の検知精度に対する依存性は小さい。
- (5) 火点検知に用いる γ の算出根拠である温度減衰式の適用範囲外に温度センサが設置されていると、期待する検知精度が得られない。
- (6) 検知された火点座標と温度センサの設置座標ならびにその温度から火源発熱速度を安全側に推定することができる。ただし、火皿下端から天井までの高さの影響が大きく、見積方法にはさらなる検討が必要である。

また今後の課題としては、成長火源や火源面積が時間的に拡大するような火災への適用可能性の検討、側壁、配置物ならびに空調の吹出 airflow など天井流性状に影響を与える条件が付加された場合の火点検知手法の検討が挙げられる。

注

- 注 1) 温度センサの直下近傍で火災が発生した場合には当該温度センサがよどみ領域に入るため、本研究で提案した手法を適用できない。したがって、火点検知に必要な温度センサ個数に1を加えた個数の温度センサからの温度情報を受け取り、最高温度を示す温度センサの情報は使用しないとするのがよいであろう。
- 注 2) 一般的な火災感知器から得られる温度情報を基に火点検知する場合、天井面に直付けされた火災感知器の感熱部(サーミスタ)は天井下4~5cmの高さに位置する。
- 注 3) 天井流の温度は天井への失熱、特に熱伝達率(天井材の種類や厚さ、および熱気流速度に応じて決まる実効値)の影響を受ける。しかし、熱伝達率も時間経過とともに変化するために、どの時間帯の温度を基に算出するかにより γ 値も変動する。今回用いた実験装置でも、時間経過とともに γ 値が徐々に上昇する傾向が見られた。但し、本研究では火災初期における火点検知を目的としているため、 γ 値の算出には着火後200~300秒の時間帯における温度を用いた。
- 注 4) 火皿下端から天井までの高さ H_f と床面から天井までの高さ H_c との間に $H_f = hH_c$ の関係がある場合、 H_f から算出した火源発熱速度 $\dot{Q}_{f(H_f)}$ と H_c から算出した火源発熱速度 $\dot{Q}_{f(H_c)}$ との間には

$$\frac{\dot{Q}_{f(H_c)}}{\dot{Q}_{f(H_f)}} = \left\{ h^{(0.81-5/3)} \right\}^{3/2}$$

の関係がある。したがって火源発熱速度を精度良く推定するためには火皿下端から天井までの高さ H_f を正確に見積もる必要がある。

凡例

a : 適用範囲の下限值[-]	r : 火源中心軸からの流動距離
b : 適用範囲の上限値[-]	[m]
C_p : 空気の比熱[J/(kg·K)]	T_∞ : 周囲空気温度[K]
dx : x軸方向のグリッド間隔[m]	ΔT : 位置 r における天井流の周囲空気温度からの上昇温度
dy : y軸方向のグリッド間隔[m]	[K]
E : 平均誤差[m]	ΔT_i : 温度センサ i の上昇温度[K]
g : 重力加速度[m/s ²]	ΔT^* : 無次元温度上昇[-]
H : 火源から天井までの高さ[m]	x_0 : 走査原点のx座標
H_c : 床面から天井までの高さ[m]	x_f : 実際の火点中心のx座標
H_f : 火皿下端から天井までの高さ[m]	$x_{f(i)}$: i 回目検知された火点のx座標
h : 床面から天井までの高さに対する火皿下端から天井までの高さの比[-]	x_1 : 温度センサ i のx座標
k : 比例定数[m ^{5/3} K/kW ^{2/3}]	x_s : 走査用のx座標
m : y軸方向のグリッド個数[個]	y_0 : 走査原点のy座標
N : 総検知回数[回数]	y_f : 実際の火点中心のy座標
n : x軸方向のグリッド個数[個]	$y_{f(i)}$: i 回目検知された火点のy座標
$\dot{Q}_f$: 火源発熱速度[kW]	y_1 : 温度センサ i のy座標
$\dot{Q}_{f(H_c)}$: H_c から算出した火源発熱速度[kW]	y_s : 走査用のy座標
$\dot{Q}_{f(H_f)}$: H_f から算出した火源発熱速度[kW]	α : 発熱速度のべき乗数[-]
Q^* : 無次元発熱速度[-]	β : 火皿下端からの天井高さのべき乗数[-]
R : 残差[-]	γ : 流動距離のべき乗数[-]
	ρ_∞ : 空気の密度[kg/m ³]

参考文献

- 1) 建築物の火災安全設計指針, 日本建築学会, 2002
- 2) R.L. Alpert : Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol.8, p181-194, 1972.

(2006年10月10日原稿受理, 2007年1月18日採用決定)