

特集 「火災に強い都市をめざして」

天井面下の熱気流温度に基づく火点位置検知手法に関する研究

山口 純一 村岡 宏
小宮 英孝

A Study on Inference Method of Fire Location

Jun'ichi Yamaguchi Ko Muraoka
Hidetaka Komiya

Abstract

In the event of a fire in a large area, it may be difficult to determine its source due to smoke from fire or furniture in the room. This paper proposes a method for determining the source on the basis of ceiling jet temperature under an unconfined ceiling. To verify its reliability, experiments were conducted in which ceiling jet temperatures were measured for a steady-state fire under an unconfined ceiling and then used to predict the fire's source. The results showed that, with 4 sensors, this method can predict a fire's source with an error of less than 20% of sensor interval.

概 要

本研究では、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リアルタイムに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) 温度センサから得られる温度情報を基に火点位置を推定するためには、平面的に異なる位置に設置された温度センサが3つ以上必要である。(2) 天井流の温度減衰特性は、天井下1cmの高さと5cmの高さとは異なる。(3) 温度情報が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。(4) 温度センサの数を3から4に増やすと検知精度が大幅に向上する。(5) 検知精度の火源発熱速度の検知精度に対する依存性は小さい。(6) 検知精度は温度センサの設置間隔と温度減衰式の適用範囲に大きく依存する。

1. はじめに

建築物の火災安全対策の主な目的として、人命安全の確保、財産の保護、消防活動の支援がある。この内の消防活動の支援に着目すると、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・救助活動を行なわなければならない。そのため消防活動を安全かつ確に行うために、建築物は活動拠点の確保や消防設備の確保に加えて、火災情報を提供する機能を持つことも重要である。特に室の床面積が数千㎡以上にもなる大規模物販店舗や生産工場等では商品陳列棚や製作機械等、または火災により発生した煙により見通しが妨げられ、建物管理者や消防隊の火点へのアクセスの遅れにより甚大な被害が生じることや、一般の利用者や消防隊が危険に曝される可能性が高くな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火災感知器からの信号をもとに発信源を特定することで出火区域をある程度把握できるが、詳細な火点の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。しかし、火災感知器等から得られる温度情報を分析することによって火点の位置や火源の発熱速度を特定し、リアルタイムでその情報を表示することができれば火災による被害をより緩和することがで

きる。そこで、火災時における火点検知に関わる基礎的研究として、平板な天井面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位置検知手法を考案するとともに、火災初期の熱気流性状を再現した無限天井下における燃焼実験結果を用いて、火点位置検知手法の妥当性の検討を行った。

2. 火点位置検知手法

本研究で対象とする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温度性状は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ベースとした火点位置検知手法を提案する。

2.1 基本的な考え方

天井下に形成される熱気流の温度は、火源面からの高さや火源中心軸からの水平流動距離に応じて減衰する。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、火源発熱速度の大小に関わらず、ある時間での発熱速度、火源面からの天井高さは、どの温度センサに対しても同じである。そのため、各温度センサの設置位置における熱気流温度は各温度センサの設置位置と火源との距離のみに依存する。そこで複数の温度センサから得ら

れた温度情報を相互に比較することによって、各温度センサの設置位置と火源との距離の関係を算出し、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)を推定するのが基本的に同じ考え方である。

2.2 本研究で用いた火点位置検知手法

天井面に温度センサを設置する場合、センサを格子状に設置することが多い。しかし、本研究ではセンサの不具合等によって部分的に使用できないセンサが生じる可能性も考慮して、センサがランダムに設置された場合にも対応する火点検知手法を検討した。

Alpert¹⁾は次元解析および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

$$\Delta T = 5.38 \frac{Q_f^{2/3} / H_{fc}^{5/3}}{(r/H_{fc})^{2/3}} \left(0.18 < \frac{r}{H_{fc}} < 4 \right) \quad (1)$$

の関係式を提案した。¹⁾ここで ΔT は火源中心軸からの水平流動距離が r の位置における熱気流の周囲空気温度からの温度上昇[K] (以後、流動距離 r における温度上昇と言う。)、 r は火源中心軸からの水平流動距離[m] (以後、流動距離と言う。)、 H_{fc} は火源面からの天井高さ[m]、 Q_f は火源発熱速度[kW]である。なお、 $r/H_{fc} \leq 0.18$ の範囲はよどみ領域と呼ばれている。

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^* [-]

$$Q^* = \frac{Q_f}{\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2} H_{fc}^{5/2}} \quad (2)$$

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下式のようにになる。

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

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

Fig. 1は、温度センサからの温度情報を基に火点位置を特定する方法を説明するための概念図である。各センサの位置は、任意に設定することができる。ここでは、各温度センサの位置を座標で表現し、センサ1から順に、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) とした。

次に、出火後の状態を考える。式(1)から分かるように、天井流の流動距離 r における温度上昇 ΔT は、火源発熱速度 Q_f 、火源面からの天井高さ H_{fc} および流動距離 r の関数と

して表現できる。しかし、天井材の種類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)を一般化して、下式のように表せると考えた。

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

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。

以上より、火点からセンサ1までの流動距離を r_1 とすると、 r_1 における温度上昇 ΔT_1 は、

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

と表せる。また、火点位置は不明であるが、火点座標を (x_f, y_f) と仮定すると、流動距離 r_1 は、

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

である。これを式(6)に再代入すると、

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

を得る。

また、同様にセンサ2の温度上昇 ΔT_2 は、

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

となる。

ここで、火源発熱速度 Q_f と天井高さ H_{fc} は、時々刻々と変化するため特定することは困難であるが、式(8)と式(9)の比を採ると、

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

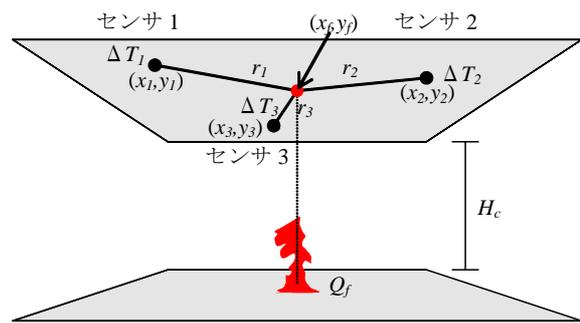


Fig. 1 出火点検知の概念図

Conceptual Diagram of Fire Location Inference

となり、火点 (x_f, y_f) のみを未知数とする関係式が得られる。

同様に、センサ2の温度上昇 ΔT_2 とセンサ3の温度上昇 ΔT_3 の比を採ると、

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

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) を検索すれば良い。

実際には火点座標をピンポイントで特定することは難しいので、式(10)および式(11)において、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、走査座標 (x_s, y_s) を移動させながら式(10)および式(11)を同時に満足するような座標を検索するのが現実的である。

Fig. 2は、火点位置の走査方法を平面的に示した概念図である。Fig. 2においては、実際の火点座標は (x_f, y_f) 、走査座標は (x_s, y_s) で示している。また、走査範囲を $n \times m$ 個のグリッドに分割した例を示しており、 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。

まず、各センサから温度 (ΔT_1 、 ΔT_2 および ΔT_3) を得る。次に走査座標 (x_s, y_s) を走査原点 (x_0, y_0) から順次、 d_x もしくは d_y ずつ移動し、その都度式(10)および式(11)を同時に満足するか否かを確認する。式(10)および式(11)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れば良い。しかし、式(10)および式(11)の基となる実験式と実際の天井流の温度が完全に一致するとは限らない。そこで本研究では、式(10)および式(11)において右辺と左辺の差を取り、それぞれの絶対値を合計したものを残渣 R として、この残渣 R が最小値を示す走査座標を火点と判断することとした。ここで残渣 R は、式(10)および式(11)から

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

となる。なお、式(12)では、式(10)および式(11)において火点座標 (x_f, y_f) となっていたところを走査座標 (x_s, y_s) に変更している。また、火点位置を特定するためには少なくとも3つの温度センサが必要であることが分かる。

3. 無限天井面下の熱気流性状

2.2で述べた火点位置検知手法を用いるためには、流動距離 r と温度上昇 ΔT の関係 (式(12)におけるべき乗数 γ) を把握しておくことが必要である。そこで、天井流の温度性状を把握するため、実大の実験装置による実験を行った。

3.1 実験概要

3.1.1 実験装置 Photo 1は、実験装置の外観を示したものである。実験装置は、17.1m(L) × 28.8m(W) × 11.1m(H) の3層吹抜空間の底部に設置した。天井は床面から3.0[m]の高さに水平に設置し、天井の寸法は8.5[m](W) × 5.8[m](D)とした。天井は、厚さ12mmの合板下地に9.5mmの石膏ボードで構成した。なお、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ため、実験装置の側面には壁は設置していない。

3.1.2 測定項目 1)温度 Fig. 3は温度の測定位置を示したものである。温度は天井面から下方に1cmおよび5cmの高さの水平面上に、天井の中心を起点として1m間隔で格子状に各45点、計90点配置した。

温度は素線径0.32mmのK型熱電対を用いて測定した。また、測定は、データロガーを介して1秒間隔で行った。

2)燃料の重量減少速度 火源発熱速度を把握するために燃料の重量減少速度を測定した。重量計はザルトリウス社製のLP64401Sを用いた。重量計の上に重量計の保護板として厚さ60[cm](D) × 60[cm](W) × 5[cm](H)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火皿を設置した。その結果、火皿(ケイ酸カルシウム板の上面高さ)は床面から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。

3.1.3 実験条件 Table 1は、本実験で実施した12ケースの実験条件を示したものである。実験では、火源設置床面から天井までの高さ(以降、天井高さと言う。)および火源規模を変化させて実験を行った。なお火源中心は、

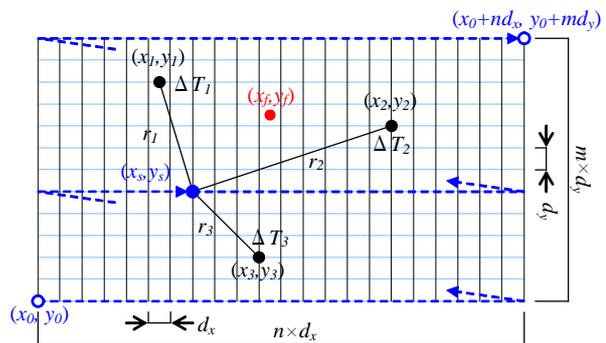


Fig. 2 火点の走査方法 Scanning Method of Fire Location



Photo 1 実験装置 Experimental Apparatus

何れのケースにおいてもFig. 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、天井高さを2.81m、2.17m、1.56mおよび0.94mの4段階に変化させた。

2) 火源規模 火源規模は、火皿の大きさを変えることで調節し、燃料にはメタノールを用いた。火皿は、深さ4cmのものを使用し、直径0.2[m]、0.3[m]、0.4[m]および0.6[m]の4種類の中から、炎が天井に接しないように火源高さごとに3種類を選択して使用した。

3.2 実験結果

3.2.1 火源発熱速度と各測定位置の温度

Fig. 4は、実験条件No. 1、2、3 (天井高さHc=2.81[m]、火皿径0.2, 0.4, 0.6[m]) 及びNo. 11 (天井高さHc=0.94[m]、火皿径0.3[m]) における火源発熱速度を着火後の経過時間に対して示したものである。何れの条件でも、発熱速度は、着火直後に急激に上昇し、それ以降は緩やかに上昇し続け、燃料が残りが少なくなると徐々に減衰する。なお、それぞれ

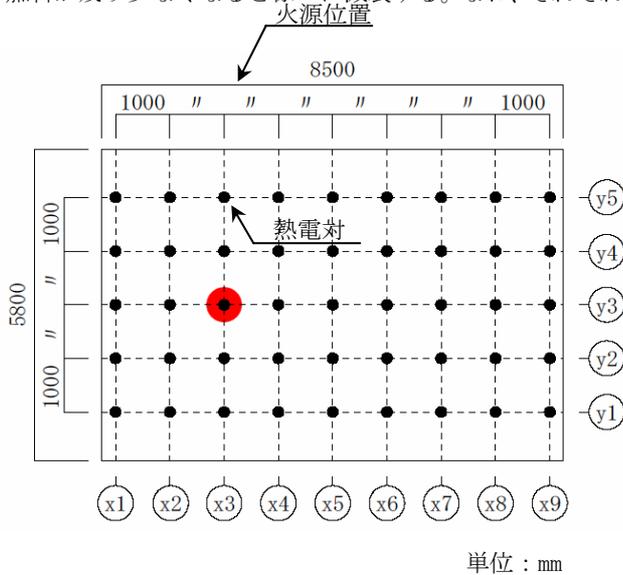


Fig. 3 熱電対配置図 (平面図)
Thermocouples Arrangement (Plan)

Table 1 実験条件
Experimental Condition

No	天井高さ H (m)	火源直径 (m)	温度測定範囲
1	2.81	φ 0.2	$0 \leq r/H_{fc} \leq 2.3$
2		φ 0.4	
3		φ 0.6	
4	2.17	φ 0.2	$0 \leq r/H_{fc} \leq 2.9$
5		φ 0.4	
6		φ 0.6	
7	1.56	φ 0.2	$0 \leq r/H_{fc} \leq 4.1$
8		φ 0.4	
9		φ 0.6	
10	0.94	φ 0.2	$0 \leq r/H_{fc} \leq 6.7$
11		φ 0.3	
12		φ 0.4	

の火源規模の60~420秒の間の平均発熱速度は、火皿径の小さいものから順に8.4kW (φ 0.2m)、21.5kW (φ 0.3m)、40.3kW (φ 0.4m)、89.5kW (φ 0.6m) であった。

Fig. 5は、実験条件No. 2 (天井高さHc=2.81[m]、火皿径0.4[m]) における、測定点座標(4, 3)、(5, 3)、(6, 3)、(7, 3)、(8, 3)および(9, 3)の天井下5 cmの高さにおける熱気流の温度を着火からの経過時間に対して示したものである。

Fig. 5より、各位置の温度は熱気流の波動にตอบสนองして細かく振動している。また、大きな傾向としては火点(3, 3)に近い位置の熱気流温度上昇は大きく、火点から遠ざかるに従い温度上昇は小さくなる。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。この遅れ時間の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の差であり、出火直後の火点位置検知精度に大きな影響を及ぼす可能性がある。

なお、実験では天井下1 cmの高さでの熱気流の温度も測定したが、天井下5 cmの高さでの熱気流温度と同様の傾向を示した。

Fig. 6は、実験条件No. 2 (天井高さHc=2.81[m]、火皿径0.4[m]) の天井下5cmにおける等温線図を示したものである。なお横軸の数値は各測定点のx座標を、縦軸の数値は各測定点のy座標を意味しており、各座標の間隔は1[m]である。また各座標における温度は、燃焼開始後120秒の時点の各測定点における温度の瞬間値を用いた。Fig. 6より、等温線は火点(3, 3)を中心とする同心円状になることが分かる。従って、Fig. 6のような緻密な等温線が得られれば、

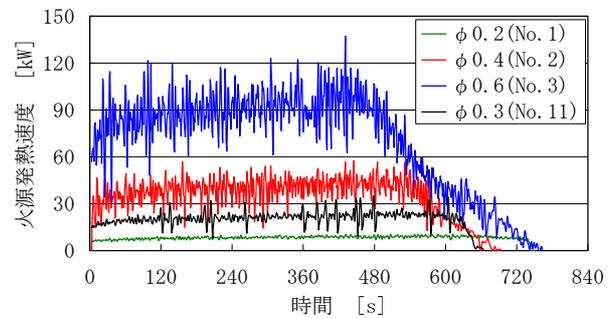


Fig. 4 火源発熱速度
Heat Release Rate of Fire Source

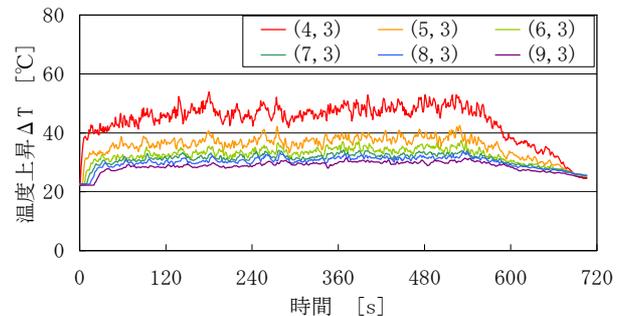


Fig. 5 各測定点の温度 (天井下5cm)
Temperature of Measured Point

2. で示した火点位置検知手法を用いなくとも火点を容易に推定できる。

一方Fig. 7は、Fig. 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等温線図を作成したものである。Fig. 7から、4点の温度情報だけでは火点を特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7~9[m]の間隔で設置されるのが一般的であり、Fig. 6のような詳細な等温線が得られることは期待できない。

3.3 天井流の温度減衰性状

一般的な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。このため以下では、天井下5cmの高さにおける温度減衰性状に関する検討を行った。

Fig. 8は、表1に示したそれぞれの実験で得られた各測定点での温度のうち、天井下5cmの高さの温度を式(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} との関係で示したものである。なお、Fig. 8に用いた温度は、各実験条件において発熱速度が定常的に推移している実験開始後60秒から480秒までの温度の平均値を用いている。

Fig. 8より、 $0.36 \leq r/H_{fc} \leq 5.0$ の範囲にあっては、無次元温度上昇 ΔT^* は無次元減衰距離 r/H_{fc} に対して概ね直線的に減衰することが分かる。そして、無次元温度 ΔT^* を $0.36 \leq r/H_{fc} \leq 5.0$ の範囲で帰帰した結果、

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

であった。

ここで、式(13)は無次元パラメータで表現されているが、出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(2)と式(3)を式(13)に代入して温度上昇 ΔT について解くと、

$$\Delta T = k Q_f^{2/3} H_{fc}^{(0.81-5/3)} r^{-0.81} \quad (14)$$

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

を得る。

4. 出火位置検知に関する検討

ここでは、2. で示した火点位置検知手法の妥当性ならびに検知誤差等を定量的に把握することを目的として検討を行った。また、式(12)の γ としては-0.81を用いている。

4.1 温度のサンプリング方法と検知精度の関係

Fig. 8は、実験条件No.2 (天井高さ $H_c=2.81$ [m]、火皿径0.4[m])において着火から121秒から150秒までの間に得られた温度情報のうち、座標(5, 3)の天井下5cmの高さにおける温度を1秒間隔で示したものである。火点位置検知に用いる温度データとしては、生データをそのまま使用方法と、Fig. 9の幾つかの実線で示したように生データをあ

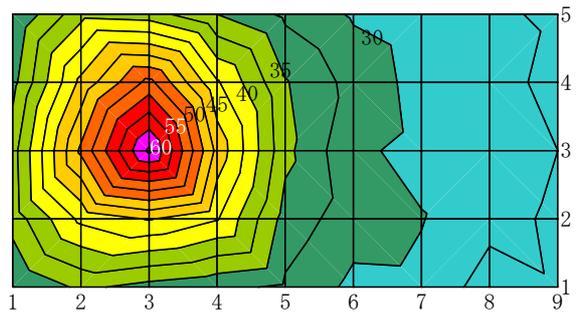


Fig. 6 全測定点の120秒時点における温度を基に作図した温度分布 (等温線間隔2.5[°C])

Isotherm Drawn by Temperature of All Measurement Points

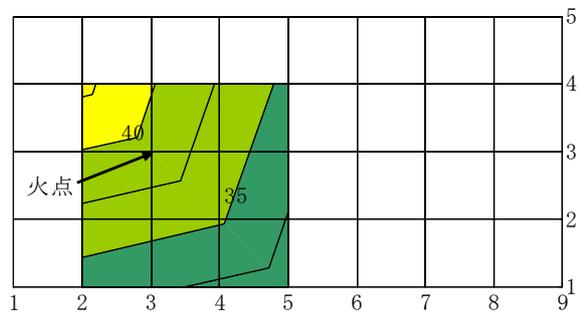


Fig. 7 (2, 1), (5, 1), (2, 4), (5, 4)の120秒時点における温度を基に作図した温度分布 (等温線間隔2.5[°C])

Isotherm Drawn by Temperature of (2, 1), (5, 1), (2, 4) and (5, 4)

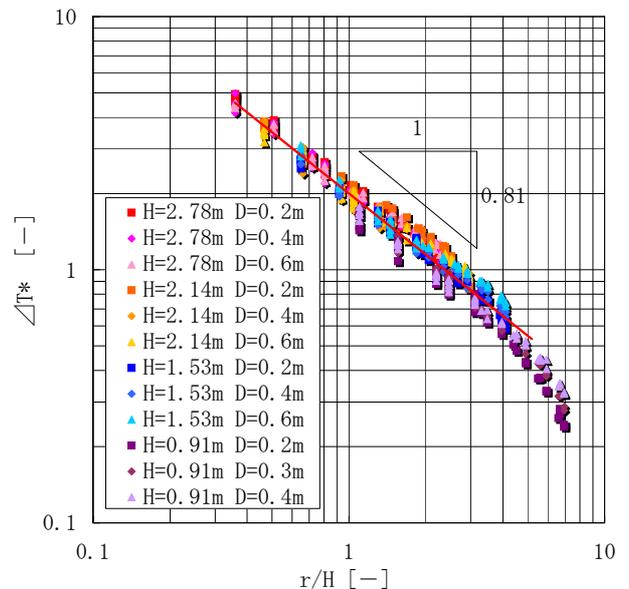


Fig. 8 無次元温度上昇の減衰 (天井下5cmの高さ)
Non-Dimensional Temperature
(Height of 5cm under the Ceiling)

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。各測定点で得られる温度情報はFig. 9に示したように小刻みに振幅しているため、できるだけ平均時間を長くした方が振幅の影響が少なくなると思われる。しかし、平均時間が長くなると急な火災性状の変化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できるだけ短い方が良い。

Fig. 10は、実験No.2において座標 (1, 1)、(5, 1)および (5, 5)の3つの温度センサから1秒毎に得られる温度情報を基に火点 (x_f, y_f) を推定し、その結果を座標上に1秒毎に示したものである。なお着火から4秒間は各センサの温度上昇が認められなかったため着火5秒後から火点の検知が始まっている。またFig. 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。

Fig. 10より、出火から120秒まで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秒以降になると検知された火点は実際の火点に近い位置を示していることが分かる。

また検知誤差を定量的に把握するために下式を用いて平均誤差 \bar{E} [m]の算出を行った。

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

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。Fig. 10に示した検知結果を基に平均誤差を算出したところ、5～210秒の平均誤差は0.75[m]であった。

Fig. 11は、実験No.2においてFig. 10と同じ座標 (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30秒間蓄積し、その30秒間の平均温度を基に火点 (x_f, y_f) を推定した結果である。なお、30秒間の平均温度を基に火点を推定するため、初めて火点検知されるのは30秒の時点である。

Fig. 11より、Fig. 10と比較すると格段に検知精度が向上していることがわかる。これはFig. 9に示したように、1秒毎に得られる温度には細かな振幅があり、平均温度を用いたことによりこの振幅の影響が緩和されたからである。また、Fig. 11に示した30～210秒の検知結果の平均誤差は0.45[m]であった。なお、同様に温度平均時間を60秒とすると平均誤差は0.40[m]となり検知精度の向上は殆ど見られなかった。

以上より、検知精度を向上させるためには30秒間程度温度を蓄積し、その間の平均温度を用いて火点位置を検知する必要があることが分かる。

4.2 センサ設置間隔と検知精度の関係

Fig. 12は、実験No.2において、座標 (1, 1)、(9, 1)および (9, 5)の3点の温度センサから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位置を推定した結果である。なお、この時の30～210秒の平均

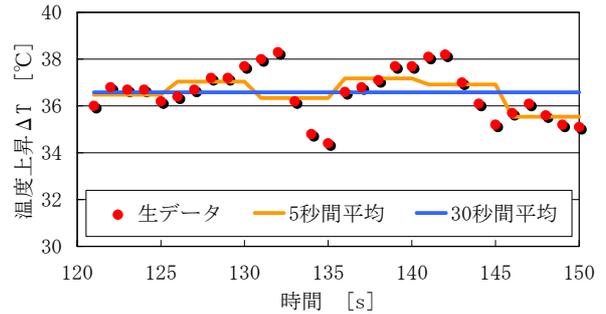


Fig. 9 測定温度のサンプリング方法
Sampling Method of Measured Temperature

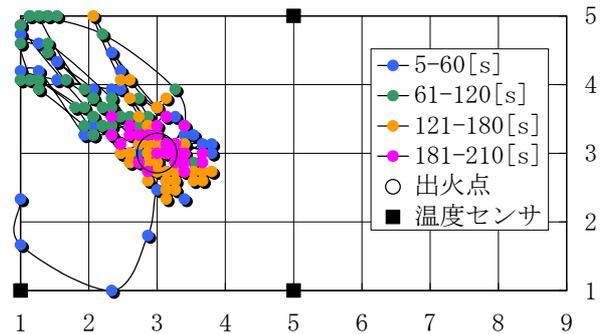


Fig. 10 3点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径0.4[m]、Hc=2.81[m]、温度平均時間1[s])
Result of Fire Location Inference (3 measured points)

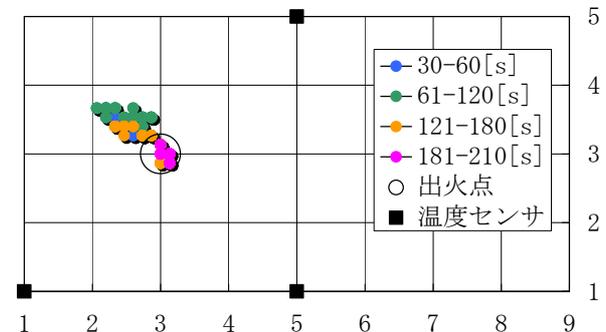


Fig. 11 3点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径0.4[m]、Hc=2.81[m]、温度平均時間30[s])
Result of Fire Location Inference (3 measured points)

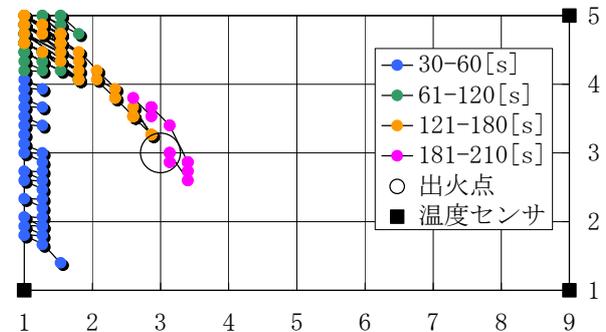


Fig. 12 3点の温度センサから火点を推定した結果
(火皿径0.4[m]、Hc=2.81[m]、温度平均時間30[s])
Result of Fire Location Inference (3 measured points)

誤差は1.81[m]であった。

Fig. 12より、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ことが分かる。

4.3 センサ個数と検知精度の関係

Fig. 13は、実験条件 (No. 2) や温度情報の平均時間 (30秒) はFig. 12のそれと同じであるが、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得られる温度を基に火点位置を推定した結果である。また、この時の30~210秒の平均誤差は0.50[m]であった。

Fig. 13より、4つのセンサを用いて検知する場合は、3つのセンサの場合と比較して検知精度が大幅に向上することが分かる。なお、30~60秒において特に検知精度が悪いのは、Fig. 5に示したように、出火点から遠い位置にある温度センサに初期の熱気流が到着するまでに時間がかかることが主な原因として考えられる。この熱気流の到着時間の差は、それぞれの温度センサをできるだけ等間隔に設置することによって幾分緩和することができる。

Table 2は、座標 (1, 1)、(9, 1)、(9, 5)の3つのセンサを用いて火点位置を検知する場合と座標 (1, 1)、(9, 1)、(9, 5)および(1, 5) の4つのセンサを用いた場合の平均誤差を全ての実験条件に対して示したものである。なお、ここで示した結果は、温度平均時間30秒とした場合の平均温度を用いて検知した火点位置を1秒間隔で出力し、その時の出火後30~210秒の平均誤差を示したものである。

Table 2より、天井高さが0.94mの実験条件ではセンサ数を変化させても検知精度の向上は見られないものの、それ以外の実験条件 (No. 1~9) では平均誤差が1/2 ~1/3程度となっている。なお、天井高さが0.94mのケースで精度の向上が見られないことについては4.4で詳しく述べるためここでは省略する。

4.4 天井高さと検知精度の関係

先に示したTable 2より、天井高さが1.56m、2.17m、2.81mの場合は、天井高さと平均誤差の間に相関は見られない。一方、天井高さが0.94mの場合は、その他の場合に比べて平均誤差が大きく、特に4点の温度センサを用いた場合はその傾向が顕著である。これは、天井高さが0.94mの場合、実際の火点(3, 3)と火点検知に用いた温度センサ(9, 1) (もしくは(9, 5))との無次元減衰距離 r/H_{fc} が6.7となっており、検知手法の基となった式(14)の温度減衰式の適用範囲($0.36 \leq r/H_{fc} \leq 5.0$)を超えていることが要因として考えられる。

以上より、温度センサの設置間隔と天井高さに応じて、温度減衰式およびその適用範囲を見直すことが必要と言える。

4.5 火源規模と検知精度の関係

先に示したTable 2より、火源規模 (火源直径) と検知精度の関係を比較すると、実験条件No. 1およびNo. 4において3つの温度センサで火点検知した場合を除けば、火源規

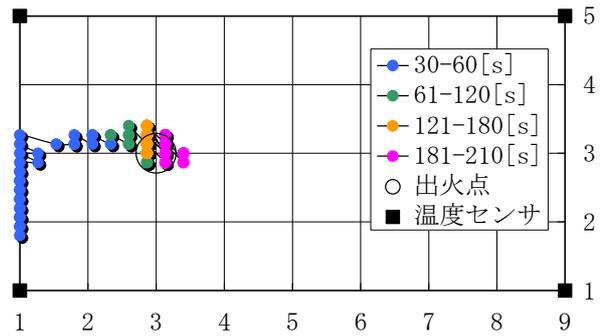


Fig. 13 4点の温度センサから火点を推定した結果 (火皿径0.4m、天井高さ2.81m、温度平均時間30秒)
Result of Fire Location Inference (4 measured points)

Table 2 センサの個数と平均誤差の関係
Relation between Sensor Number and Average Error

実験 No.	天井高さ [m]	火源直径 [m]	平均誤差 [m]	
			3点※1	4点※2
1	2.81	0.2	1.38	0.72
2		0.4	1.81	0.50
3		0.6	1.32	0.53
4	2.17	0.2	1.46	0.73
5		0.4	1.56	0.49
6		0.6	0.94	0.52
7	1.56	0.2	2.17	1.10
8		0.4	1.04	0.42
9		0.6	0.93	0.42
10	0.94	0.2	1.90	1.86
11		0.3	1.37	1.58
12		0.4	1.39	1.10

※1 座標 (1, 1)、(9, 1)、(9, 5)の3つのセンサを用いた場合

※2 座標 (1, 1)、(1, 5)、(9, 1)、(9, 5)の4つのセンサを用いた場合

模が大きくなるほど平均誤差は小さくなる傾向がある。

5. 火源発熱速度の推定

5.1 火源発熱速度の推定方法

火点位置が特定できると、任意のセンサから得られた温度上昇 ΔT_i [K]と推定された火点とその温度センサまでの減衰距離 r_i [m]を用いて、火源の発熱速度を推定することができる。以下にその方法を述べる。

式(16)を火源発熱速度 Q_f [kW]について解くと

$$Q_f = \left(\frac{\Delta T_i}{k H_{fc}^{(0.81-5/3)} r_i^{-0.81}} \right)^{3/2} \quad (16)$$

ここで、 k は、

$$k = \frac{2.03 T_\infty}{(C_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2})^{2/3}} \quad (17)$$

である。式(17)に、雰囲気温度 T_∞ (=293[K])、雰囲気密度 ρ_∞ (=1.2[kg/m³])、定圧比熱 C_p (=1.0[kJ/kgK])および重力加速度 g (=9.8[m/s²])を代入すると、

$$k = 5.6 \text{ [m}^{5/3}\text{K/kW}^{2/3}\text{]} \quad (18)$$

を得る。

温度上昇 ΔT_i は、複数の温度センサから得られた温度情報のうちの1つを任意に選択する。また、減衰距離 r_i は、選択した温度センサの座標 (x_i, y_i) と火点検知の結果得られた火点座標 (x_f, y_f) から、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2} \quad (19)$$

により算出する。

式 (16) における天井高さ H_{fc} [m] は、燃焼物 (面) から天井までの高さであるが、火災時の燃焼物がどの高さに位置しているのか不明である。しかし、天井高さとして床面からの天井高さ H_c [m] を採っておけば火源発熱速度を大きめに見積もることになるため実用上支障はない (安全側の推定) であろう。

5.2 火源発熱速度の推定結果

図14は、図13に示した火点位置検知結果 (実験条件 No. 2: 火皿径0.4m、天井高さ2.81m) および座標 (9, 5) の温度情報を基に、式(16)を用いて火源発熱速度を推定した結果である。

図14より240秒以降になると推定値の方が実測値より2割程度大きな値を示すが、比較的良好な推定結果と言える。なお、先に述べたように、式(16)における天井高さは本来、燃焼物 (燃焼面) から天井までの高さ H_{fc} [m] としなければならない。しかし、燃焼物の高さを推定することはできないので、実務的には燃焼物 (面) からの天井高さの代わりに床面からの天井高さ H_c [m] を使用することになる。その場合、燃焼物 (面) からの天井高さは床面からの天井高さより小さいため、火源発熱速度の推定値は実際の値よりも大きく算定されるので注意が必要である。

6. まとめ

本研究では、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リアルタイムに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。

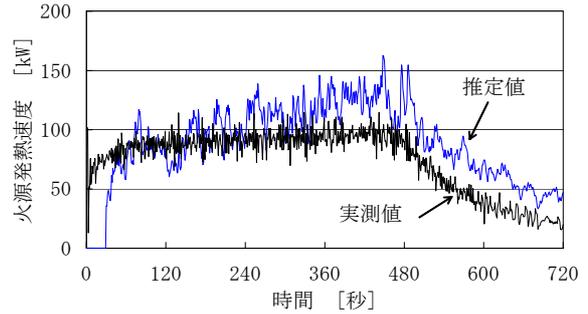


Fig. 14 発熱速度推定結果の一例
(火皿径0.4m、天井高さ2.81m、温度平均時間30秒)
Result of Heat Release Rate Inference

- 1) 温度センサから得られる温度情報を基に火点検知を行う場合、平面的に異なる位置に設置された温度センサが3つ以上必要である。
- 2) 温度情報を30秒程度蓄積し、その平均温度を用いると検知精度が向上する。
- 3) 温度センサの数を3から4に増やすと検知誤差が1/2程度となる。
- 4) 温度センサが温度減衰式の適用範囲外に設置されると検知精度が低下する。
- 5) 火点位置検知結果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、燃焼物 (面) からの天井高さの設定方法については課題が残る。

謝辞

出火点検知実験を行うにあたり横浜国立大学岡泰資助教授ならびに同大学4年生新田孝太郎君には多大なご尽力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) R.L.Alpert, Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol.8, p181-194, 1972