

火災初期の火点位置検知手法に関する研究

山口 純一 村岡 宏
間瀬 亮平

Detection Method of Fire Location during Early Stages of Fire

Jun'ichi Yamaguchi Ko Muraoka
Ryohei Mase

Abstract

This paper proposes a method for determining the fire location and the heat release rate in the early stages of a fire based on the ceiling jet temperatures under an unconfined ceiling. The results are presented as follows. 1) By correlating the ceiling jet temperature and the traveling time of the ceiling jet derived from a dimensional analysis and comparing with experimental results, predictive equations for the increase in the ceiling jet temperature and traveling time were developed. 2) By comparing the prediction result and the experimental result of the increase in the ceiling jet temperature, the equations of the ceiling jet can be said to predict the fire location in the early stages of a fire with a sufficient accuracy. 3) The detection accuracy of the fire location in the early stages of a fire was improved by 30% when the predictive equations were incorporated into a previous detection method.

概 要

本研究では、火災初期において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および火災規模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、以下の知見が得られた。1) 天井流の次元解析式と実験結果との比較によって、火源発熱速度の成長率に依存しない天井流の温度上昇予測式および流動時間予測式が得られた。2) 火災初期の天井流温度上昇について実験結果と予測結果を比較したところ、予測式は高い予測精度を有することが分かった。3) 1)で提案された予測式を従来の火点検知手法に導入した結果、火災初期の検知精度が30%向上した。

1. まえがき

建築火災時の被害拡大は、着火物の燻焼から有炎着火、隣接可燃物への延焼、隣接区画への延焼、上階（下階）延焼の過程をたどる。また、これに加え、可燃物の燃焼により生じた有害ガス（煙）が、火災室から廊下等（避難経路）、堅穴、上階へと急速に拡散する。

このような火災または煙による物的、人的被害を軽減するため、建築物には様々な火災安全対策が講じられている。火災安全対策は、初期消火や避難誘導等の人的対策、火災感知器や排煙設備等の設備的対策および防煙垂れ壁や避難階段等の建築的対策に大別されるが、これらの対策が適切に配置され、または適切に機能してはじめて所定の安全性を確保することができる。

ここで、火災規模とある水準の安全性を確保するために必要な対策との関係について考えてみる。火災規模が大きくなるほど安全性を確保するための対策規模も増大することは容易に想像できる。

一方、火災は、爆発的に拡大するのではなく、時間の経過と共に徐々に拡大していくので、同じ対策（費用）を投じるのであれば、火災が拡大した後に機能する安全対策よりも火災規模の低減効果の大きい対策を優先して増強し

た方が安全性の向上に寄与すると言える。特に、火災感知設備やスプリンクラー設備に代表される火災初期の火災安全対策の品質向上や信頼性向上が重要である。

過去の研究¹⁾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た温度データを基に、火災発生位置および火源規模を推定する手法を提案し、その妥当性の検証を行った。

しかし、この研究で用いた火源は、定常的に燃焼する火災を模擬したもので、通常の火災で想定されるような時間の経過とともに拡大する火源（以後、成長火源と呼ぶ）に基づくものではなかった。成長火源が生じた場合に、天井面下の熱気流温度を基に火点や火源規模を正確に推定するには、火源から発生した熱気流が天井面下のある位置に到達するまでの時間（以後、流動時間と呼ぶ）や火点からの距離と熱気流温度との関係を把握する必要がある。

そこで本研究では、天井流の温度及び流動時間の基礎式を次元解析より導き、発熱速度の時間的変化および天井高さを変えた33ケースの燃焼実験との比較により予測式を提案した。さらに、そこで得られた天井流温度および流動時間の予測式を基に火災初期の火点検知手法を提案し、検知精度の確認を行った。

2. 天井流性状の次元解析

無限天井下の天井流温度および任意の位置に至る流動時間について次元解析を行う。

Fig. 1は、本研究で想定した無限天井空間の概念図を示したものである。天井高さが H [m]一律で、火源直上から任意の位置までの水平距離を r [m]とし、火源発熱速度が Q [kW]である時に生じた熱気流が、任意の位置に至るまでの流動時間を t_{travel} [s]、到達した時点の任意の位置における天井流温度上昇を ΔT [K]とする。

また、本研究で対象とする火源は、時間の n 乗に比例することを前提とする。以降では、火源発熱速度 Q [kW]は

$$Q = Q_0 t^n \quad (1)$$

と表す。ここで、 n は時間のべき乗数、 Q_0 は火災成長係数[kW/s ^{n}]である。なお、本研究では、 $n=0$ の時を定常火源、 $n > 0$ の時を成長火源と呼ぶ。

2.1 次元解析を行う上での仮定

次元解析は以下の仮定の下で行った。

- ①水平で凹凸のない無限の大きさの天井下面を流動する流れを対象とする。
- ②Boussinesq 近似が有効である。
- ③ある発熱速度で生じた熱気流性状は、成長火源、定常火源による違いはないと見なす。
- ④上昇する火災プルームと水平に流れる天井流を連続的な一つの流れとして扱う。また、火源から任意の位置までの熱気流の流動距離は、火源表面から天井までの高さ H と火源直上から任意の位置までの水平距離 r の和として、 $H+r$ （以降、流動距離と呼ぶ）で表わす。
- ⑤天井に沿って伝播する天井流中の流速、上昇温度は鉛直方向にガウス形の分布をもつ。
- ⑥天井流の通過断面積は、Fig. 2に示すように、流動距離の C_1 倍に比例すると仮定して、

$$A = \pi \{C_1(H+r)\}^2 \quad (2)$$

と表す。これは、中村ら²⁾による天井流温度予測式と同様の扱いである。

- ⑦天井流のフルード数は、天井面への失熱の影響があるので、Heskestad ら³⁾と同様に、流動距離と共に変化すると考える。なお、Heskestad らは、フルード数（の平方根）について、

$$\sqrt{Fr} = \frac{u}{\sqrt{(\Delta T/T_\infty)gH}} \propto \left(\frac{r}{H}\right)^{-0.63} \quad (3)$$

なる実験式を提案しているが、火源直上($r=0$)における熱気流の流速 u がゼロとなるため、天井流の流速を適切に表現できないと考えられる。そこで、本研究では、熱気流の上昇温度 ΔT と流速 u との間に式(4)の関係が成り立つものと仮定した。

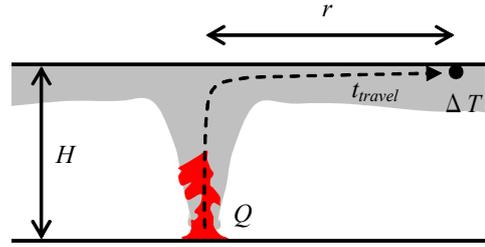


Fig. 1 天井流の概念図
Conceptual Schematic of Ceiling Jet

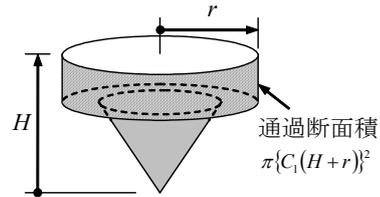


Fig. 2 天井流の通過断面積の概念図
Conceptual Schematic of Cross-Sectional Area

$$\sqrt{Fr} = \frac{u}{\sqrt{(\Delta T/T_\infty)g(H+r)}} = C_3 \cdot \left(\frac{H+r}{H}\right)^\delta \quad (4)$$

ここで、 T_∞ は周囲空気の温度[K]、 g は重力加速度[m/s²]、 C_3 は天井面における熱気流のフルード数の平方根の係数、 T_∞ は周囲空気の温度[K]、 g は重力加速度[m/s²]、 δ は無次元流動距離のべき乗数である。

2.2 天井流の温度上昇に関する次元解析

発熱速度 Q に基づく熱気流は、任意の位置(H, r)での熱気流の上昇温度を ΔT [K]、平均流速を \bar{u} [m/s]とし、さらに天井への失熱を無視すれば、

$$C_2 Q = C_p \rho_\infty A \Delta T \bar{u} \quad (5)$$

と表せる。ここで C_2 は総発熱速度のうち熱気流によって運ばれる熱量の割合、 C_p は空気の比熱[kJ/(kg·K)]、 ρ_∞ は空気の密度[kg/m³]である。

式(2)、(4)を式(5)に代入し、さらに火災安全工学の分野で頻繁に使用される無次元発熱速度

$$Q^* \equiv \frac{Q}{C_p \rho_\infty T_\infty^{1/2} H^{5/2}} \quad (6)$$

を用いて熱気流の温度上昇 ΔT を導出すると、

$$\Delta T = \left(\pi \frac{C_1^2 C_3}{C_2} \right)^{-2/3} T_\infty Q^{*2/3} \left(\frac{H+r}{H} \right)^{-(5+2\delta)/3} \quad (7)$$

を得る。

また、式(7)は

$$\Delta T^* \equiv \frac{\Delta T/T_\infty}{Q^{*2/3}} \quad (8)$$

で定義される無次元温度上昇 ΔT^* を用い、さらに

$$C_4 = \left(\pi \frac{C_1^2 C_3}{C_2} \right)^{-2/3} \quad (9)$$

とおくと、式(8)および式(9)を式(7)に代入することで

$$\Delta T^* = C_4 \left(\frac{H+r}{H} \right)^{-(5+2\delta)/3} \quad (10)$$

と表現される。

2.3 天井流流動時間の次元解析

式(5)を式(4)に再代入して ΔT を消去すると、平均流速 \bar{u} は

$$\bar{u} = (C_2 C_3^2)^{1/3} \left(\frac{g}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} Q^{1/3} \left(\frac{H+r}{A} \right)^{1/3} \left(\frac{H+r}{H} \right)^{2\delta/3} \quad (11)$$

となる。ここで、火源から生成した熱気流の t 秒後の流動距離 $H+r$ は、最大流速 u_{\max} に依存すると考えられるため、 u_{\max} を生成時から t 秒まで時間で積分することにより求まる。すなわち、

$$H+r = \int_0^t u_{\max} dt = e \int_0^t \bar{u} dt \quad (12)$$

となる。なお、「2.1次元解析を行う上での仮定」における⑤の仮定を利用している。

よって、式(2)および式(11)を式(12)に代入し時間 t について解くと、流動距離 $H+r$ の位置に到達するまでの流動時間 t_{travel} として、

$$t_{\text{travel}} = \frac{1}{e C_3 C_4^{1/2}} \left(\frac{g}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{-1/3} Q^{-1/3} H^{2\delta/3} (H+r)^{(4-2\delta)/3} \quad (13)$$

を得る。なお、式(7)の無次元発熱速度を用いて式(13)を整理すると、

$$t_{\text{travel}} \left(\frac{g}{H} \right)^{1/2} Q^{*1/3} = \frac{1}{e C_3 C_4^{1/2}} \left(\frac{H+r}{H} \right)^{(4-2\delta)/3} \quad (14)$$

となる。ここで、式(14)の左辺は無次元時間 t^* と呼ぶこともできる⁴⁾。

3. 実験の概要と結果

次元解析によって求めた天井流の温度上昇予測式および流動時間予測式の妥当性を検証するために、側壁の存在しない模擬無限天井空間にて火災実験を行った。なお、種々の火源での予測式の適用性を検討するために、定常火源および成長火源を用いて実験を行った。

3.1 実験装置

実験に使用した天井の大きさは8.5m(W)×5.8m(L)で、床面から3mの高さに水平に設置した。この天井は厚さ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

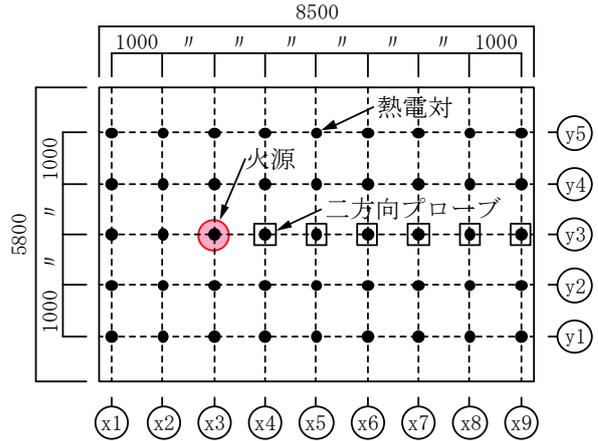


Fig. 3 温度および流速の測定位置 (平面図)
Measurement Positions of Temperature and Velocity (Plan View)

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。

Fig. 3は、天井面下における温度および流速測定点の配置と火源位置の関係を示したものである。

3.2 測定項目

3.2.1 温度 素線径0.2mmのK型熱電対を天井面から鉛直下方に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。

3.2.2 流速 天井面から鉛直下方に5cmの高さに二方向プローブを設置し、微差圧計 (varidine社製, CD280) で圧力差を測定した。なお、二方向プローブは、Fig. 3の(x,y)=(4, 3), (5, 3), (6, 3), (7, 3), (8, 3), (9, 3)の6箇所に設置し、データロガーを介して1秒間隔で測定した。

3.2.3 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) を用いて測定した。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。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、その上に燃料を設置した。このため、ケイ酸カルシウム板の上面は床面から19cmの高さに位置している。

3.3 実験条件

実験は、天井高さ及び火源発熱速度を変えて合計33ケース実施した。

3.3.1 天井高さ 高さ調節機構の付いた仮設ステージに火源を設置することによって、火源から天井までの高さを0.94, 1.6, 2.2, 2.8mの4段階に変化させた。なお、天井高さ2.8mについては仮設ステージを設けず、床面に火源を設置している。

3.3.2 火源 実験は時間のべき乗数 n および火源の火災成長係数 Q_0 を変えて実施した。べき乗数は $n=0, 1, 2$ の3タイプを想定して行った。火源位置は何れのケースにおいて

もFig. 3の(x,y)=(3,3)とした。

1) 定常火源(n=0) 燃料にはメタノールを用い、ステンレス製の燃料火皿(円形)の直径を変えることで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0.2, 0.3, 0.4, 0.6mの4種類の中から、天井に接炎しないように、天井高さごとに3種類の火皿を選択して実施した。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19.8MJ/kgである。

2) 成長火源(n=1) Fig. 4に示すように6行6列に配置した直径100mmの燃料火皿36個を平面的に並べ、Fig. 4に示した番号に従い順次着火することで再現した。火災成長係数 Q_0 はそれぞれの火皿の着火間隔を調整することによって変化させた。燃料にはエタノールを用いた。n=1の実験は、火災成長係数を4種類、天井高さを1.6, 2.8mの2種類に変化させた計8ケースを実施した。なお、本研究で使用したエタノールの理論発熱量は25.6MJ/kgである。

3) 成長火源(n=2) アルコールと木材クリブを燃料として用いた火源を使用した。

アルコール火源では、n=1の場合と同様に、6行6列に配置した36個の燃料火皿の着火のタイミングを調整することでn=2の火源を再現した。アルコール火源の実験は火災成長係数を5種類、天井高さを1.6, 2.8mの2種類に変化させた計10ケースを行った。

木材クリブ火源は、2.5cm×2.5cm×42.5cmの木材(米杉)を格子状に4段に組んだ木材クリブ小(寸法42.5cm×42.5cm×10cm)と、Fig. 5に示すような、8段に組んだ木材クリブ大(寸法42.5cm×42.5cm×20cm)の2種類を使用した。木材クリブ小では天井高さを1.6, 2.7mの2種類、木材クリブ大では天井高さを2.7mの計3ケースの実験を行った。また、木材クリブの下に直径10cmの燃料火皿に30gのメタノールを投入し着火剤として使用した。なお、木材クリブの理論発熱量は16.1 MJ/kgを用いた。

以上1)~3)に示した実験ケースをまとめたものがTable 1である。なお、表中に示した火災成長係数 Q_0 は燃料の重量減少速度に発熱量を乗じて算出した発熱速度の実測値から算出した数値である。

3.2 実験結果

Fig. 6は、定常火源(n=0)、アルコール成長火源(n=1, 2)、木材クリブの発熱速度の時間変化の一例を示したものである。定常火源(n=0, H=0.94, $Q_0=40$)は約60秒でほぼ定常状態に達することが分かる。アルコール成長火源(n=1, $Q_0=0.39$ またはn=2, $Q_0=0.022$)は何れも100kWに達するまでは想定の時刻歴を示している。クリブ火源(大)の火災成長係数が小さく、200秒に至るまでは概ね時間の2乗に比例している。

3.3 天井流の温度と流速の時間変化

Fig. 7は、n=2, H=2.8m, $Q_0=0.005\text{kW/s}^2$ の実験条件において、火源から1, 2, 4, 6mの位置における天井流の温度の時間変化を示したものである。



Fig. 4 火皿配置と着火順序
Fuel Tray Arrangement and Ignition Order

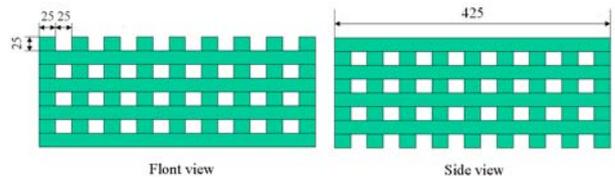


Fig. 5 木材クリブ(大)
Geometric Arrangement of Wood Pallets (Large)

Table 1 実験ケース
Experimental Conditions

火源モデル	時間tのべき乗数n	燃料	天井高さH[m]※1	火災成長係数 Q_0 [kW/s ⁿ]	実験No.			
Q=Q ₀	0	メタノール	0.94	8.2	0-1			
				21	0-2			
				40	0-3			
			1.6	8.2	0-4			
				40	0-5			
				94	0-6			
			2.2	8.2	0-7			
				40	0-8			
				91	0-9			
			2.8	8.2	0-10			
				39	0-11			
				91	0-12			
Q=Q ₀ t	1	エタノール	1.6	0.39	1-1			
				0.79	1-2			
				1.33	1-3			
			2.8	2.30	1-4			
				0.42	1-5			
				0.79	1-6			
			1.29	1-7				
			2.36	1-8				
			Q=Q ₀ t ²	2	エタノール	1.6	0.005	2-1
							0.012	2-2
							0.022	2-3
							0.040	2-4
0.067	2-5							
2.8	0.005	2-6						
	0.012	2-7						
	0.025	2-8						
	0.043	2-9						
	0.057	2-10						
木材	1.6	0.001			2-11			
	2.7	0.002			2-12			
0.003	2-13							

※1 火源設置床面からの天井高さ

Fig. 7より、何れの位置においても着火直後は温度上昇が見られず、その後火源に近い位置から順に温度は上昇することが分かる。これは、火災初期に形成された熱気流はその後新たに供給された熱気流に押されるようにして次第に遠くへ流動していくためである。

4. 予測式の提案

ここでは、2章において次元解析で算出した天井流の温度上昇解析式(4)と流動時間解析式(5)と3章で行った実験結果とを比較することによって、未確定の係数 C_3 、 C_4 およびべき乗数 δ を決定する。

4.1 フルード数と無次元流動距離の関係

Fig. 8は、各実験ケースにおけるフルード数の平方根と無次元流動距離 $(H+r)/H$ の関係を示したものである。図6より、無次元流動距離の増加にともないフルード数は減少することが分かる。また、フルード数は、多少のばらつきが見られるが、無次元流動距離のみによって決まることがわかる。この結果を基に、式(4)における係数 C_3 および無次元流動距離のべき乗数 δ を算出したところ、比例定数 C_3 は0.285、べき乗数は-0.5となった。すなわち、式(4)は

$$\frac{u}{\sqrt{(\Delta T/T)g(H+r)}} = 0.285 \left(\frac{H+r}{H} \right)^{-1/2} \quad (15)$$

となる。さらに、式(15)は

$$\frac{u}{\sqrt{(\Delta T/T)gH}} = 0.285 \quad (16)$$

と表すこともできる。なお、式(16)の右辺の数値(0.285)について、須川ら⁵⁾は0.25を提案している。

4.2 無次元温度上昇と無次元流動距離の関係

式(10)で示した無次元温度上昇 ΔT^* の補正係数 C_4 ならびに無次元流動距離に対するべき乗数について検討を行う。ただし、ここでは天井流の温度減衰は定常火源のケースについてのみ検討を行った。

Fig. 9は、定常火源の天井流の無次元温度上昇と無次元流動距離の関係を示したものである。この結果を基に、式(10)における係数 C_4 および無次元流動距離のべき乗数を算出したところ、比例定数 C_4 は4.73、べき乗数は-4/3 ($\delta = -0.5$) となった。すなわち、式(11)は

$$\Delta T^* = 4.73 \left(\frac{H+r}{H} \right)^{-4/3} \quad (17)$$

となる。

4.3 流動時間と無次元流動距離の関係

Fig. 8またはFig. 9より求めた比例定数 C_3 、 C_4 および $\delta = -0.5$ を式(14)に代入すると、流動時間の予測式として、

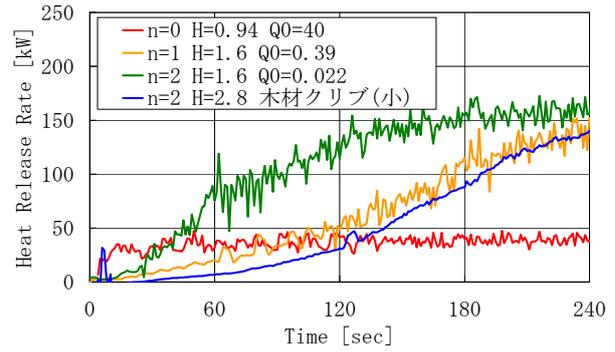


Fig. 6 発熱速度の時間変化
Typical Time Histories of Heat Release Rates
($n=0, 1$ and 2)

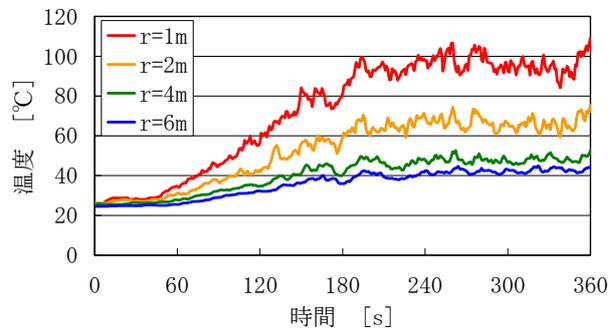


Fig. 7 天井流の温度の時間変化
Typical Time Histories of Temperature Rise
($n=2, H=2.8m, Q_0=0.005kW/s^2$)

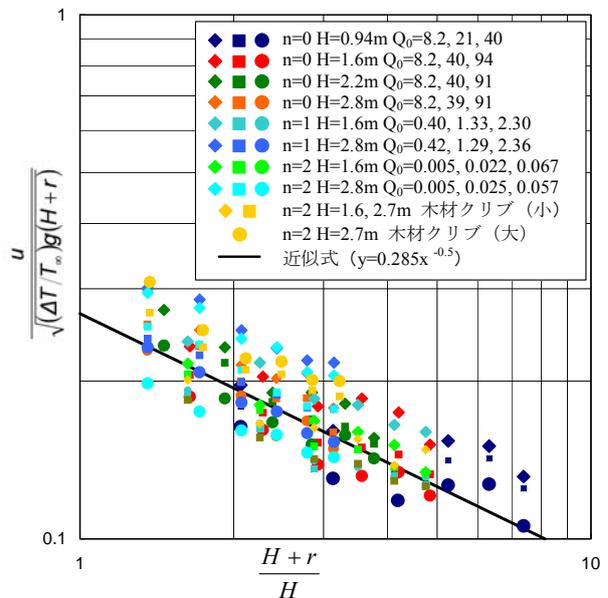


Fig. 8 フルード数と無次元流動距離の関係
Relationship between Square of Froude Number and
Non-dimensional Traveling Distance

$$t_{travel} \left(\frac{g}{H} \right)^{1/2} Q^{*1/3} = 0.59 \left(\frac{H+r}{H} \right)^{5/3} \quad (18)$$

を得る。

Fig. 10は、天井高さH=2.8m, n=2, Q₀= 0.025kW/s²の条件について、水平方向にr=5m離れた位置における天井流温度の時間変化について予測値と実測値とを比較したものである。なお、予測値については流動時間t_{travel}を考慮した場合と考慮しない場合について示している。

Fig. 10より、流動時間t_{travel}を用いて天井流の温度を予測することで実測値に近い予測結果を得ることができる。また、初期の立ち上がりにおいて急激に温度が上昇していることも再現できていることが分かる。なお、このような急激な温度上昇は、流動距離rが長いほど顕著になると考えられ、大規模空間では避難安全性を低下させる一因になる可能性が高い。

5. 火点検知手法に関する検討

ここでは前章で得られた火災初期の天井流性状(温度上昇及び流動時間)の予測式を従来の火点検知手法¹⁾に導入し、さらに従来手法と本手法の火災初期の検知精度の比較を行った。

5.1 火点検知の基本的な考え方

天井流の温度は、火源中心軸からの流動距離に応じて減衰する。そのため、各温度センサの近傍における天井流温度は流動距離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。(Fig. 11参照) これは、地震発生直後に複数の観測点で得られた地震波データから、震源情報を推定するのと同様である。

5.2 火点検知手法の改良点

検知手法の基本的な考えは従来手法と同じである。以下では、従来手法からの変更点を示す。

1) 温度減衰式

従来手法ではAlpertの提案式⁶⁾を使用していたが、温度センサ直下で火災が発生した場合は適用できないという欠点があった。そこで、本手法では前章で提案した温度予測式(19) (式(10)を有次元に戻した式) を使用してこの問題を改善した。

$$\Delta T = 13Q^{2/3}H^{-1/3}(H+r)^{-4/3} \quad (19)$$

2) 天井流の流動時間

従来手法では、火源発熱速度の時間に対するべき乗数nが大きくなると火災初期の検知精度の低下が見られたが⁷⁾、本手法では天井流流動時間の予測式(20) (式(14)を有次元に戻した式) を考慮することでこれを改善した。

$$t_{travel} = 1.97Q^{-1/3}H^{-1/3}(H+r)^{5/3} \quad (20)$$

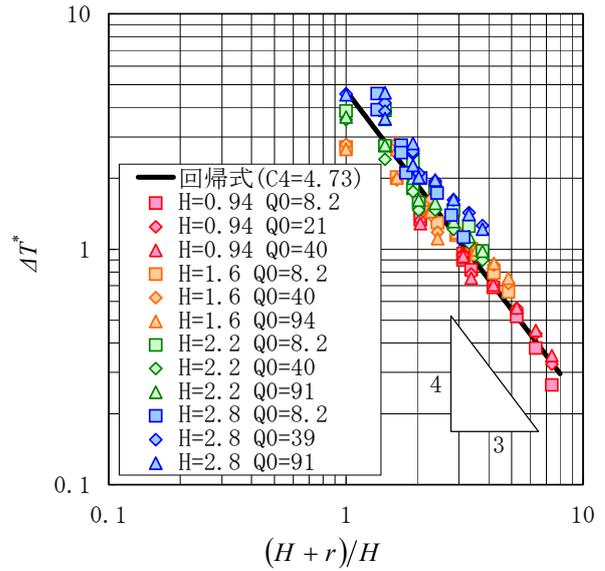


Fig. 9 天井流の温度減衰 (定常火源)
Temperature Decreasing Property of Ceiling Jet in Steady Fires

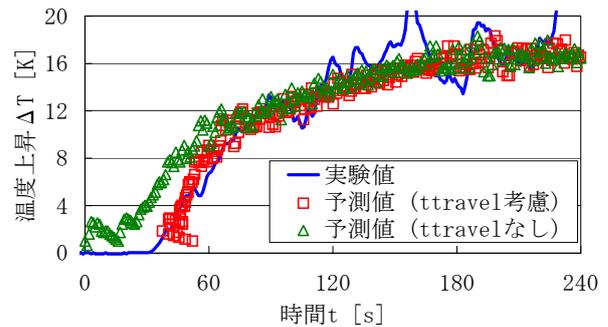


Fig. 10 天井流温度上昇の予測結果(n=2, Q₀=0.025kW/s²)
Comparison between Measured and Predicted Temperature Rise

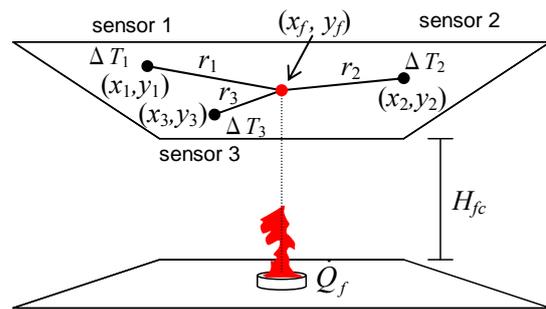


Fig. 11 火点位置検知の概念図
Conceptual Scheme for Detecting the Fire Breakout Point

3) 天井高さ

従来手法では天井高さ(火源面からの天井高さ)を既知とする必要はなかったが、本手法では天井高さを必要とする。

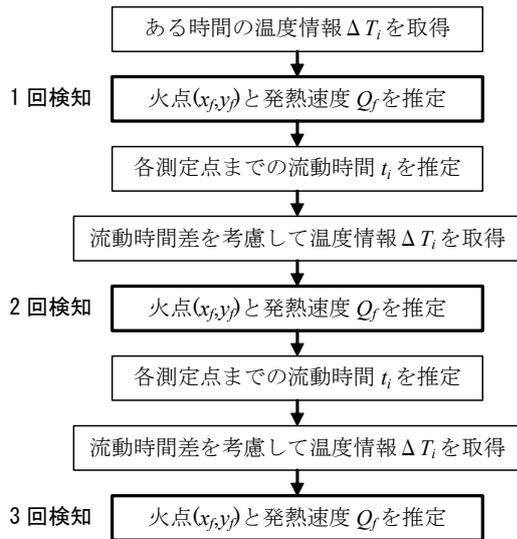


Fig. 12 検知手順
Calculation Procedure

4) 検知手順

Fig. 12は本手法の検知手順を示したものである。ある時間の温度情報を基に、火点および発熱速度を推定する（1回検知）。次に、1回目検知の情報を基に、各測定点までの流動時間を推定し、流動時間の遅れを考慮した各測定点の温度情報を基に、火点および火源発熱速度を推定する（2回検知）。最後に、2回目検知の情報を基に、2回検知と同様の手順で、火点および火源発熱速度を推定する（3回検知）。なお、同様の手順を4回、5回と繰り返すことも可能である。

5.3 検知結果

ここでは、木材クリブ（大）、天井高さ2.7mの実験結果で得られた温度情報を基に火点検知した結果を示す。

Fig. 13は、火源（火点）と火点検知に使用した温度センサの設置位置との関係を示したものである。

また、Fig. 14は、各温度測定点における温度上昇の時刻歴（検知に使用した温度情報）を示したものである。なお、火源から一番離れた温度センサ（9,5, r=6.3m）は点火から66秒後に熱気流が到達して温度上昇が始まっている。

Fig. 15は、従来の手法¹⁾を用いて、Fig. 14に示した温度情報を基に火点を推定し、その結果を座標上に1秒毎に示したものである。なお、Fig. 15には実際の火点座標と検知に用いた温度センサの座標も合わせて表示している。また、温度センサ④（座標(9,5)）の温度上昇が認められた着火の66秒後から検知開始が始まっている。

Fig. 15より、検知した火点は着火後66秒から90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。また、91秒以降では次第に検知された火点は実際の火点に近づき、121秒以降は精度良く火点を推定できていることが分かる。

Fig. 16は、Fig. 12に示した検知手順に従い、Fig. 14の

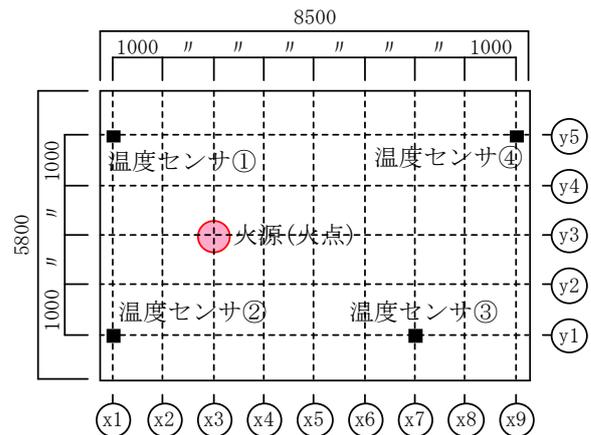


Fig. 13 検知に使用した温度センサと火源の関係
Relationship between Thermocouple Arrangement and Fire Source Location (Plan View)

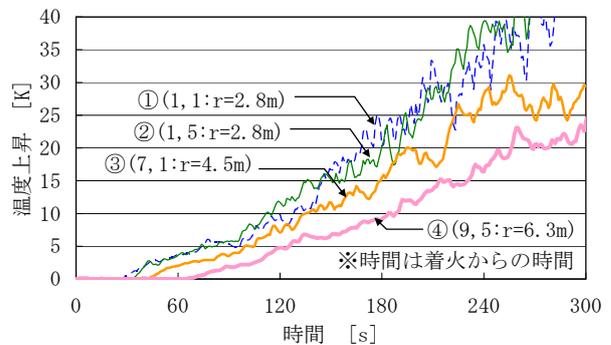


Fig. 14 温度上昇の経時変化
Time Histories of Temperature Rise

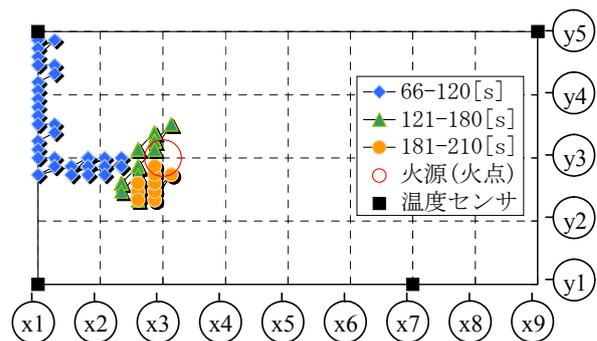


Fig. 15 従来手法¹⁾による検知結果（平面図）
Detection Results based on the Previous Method¹⁾ (Plan View)

温度情報を用いて検知を行い、その結果を座標上に1秒毎に示したものである。

Fig. 16によれば、本手法を用いた場合、従来の手法と比較して着火後66秒から120秒までの間の検知精度が向上していることが分かる。また、121秒以降は従来の手法と同等の精度で火点を推定できている。

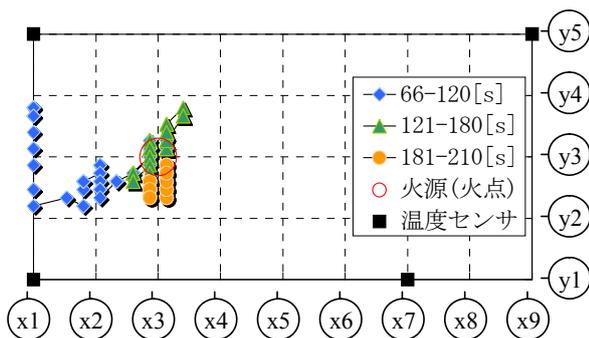


Fig. 16 本手法による検知結果 (平面図)
Detection Results based on the Proposed Method (Plan View)

Table 2 検知誤差の比較
Relationship between Detection Method and the Mean Error

時間帯	従来の手法A	本手法B	改善率 = (A-B) / A
66s-120s	1.66m	1.15m	31%
121s-180s	0.51m	0.41m	21%
181s-210s	0.51m	0.48m	7%

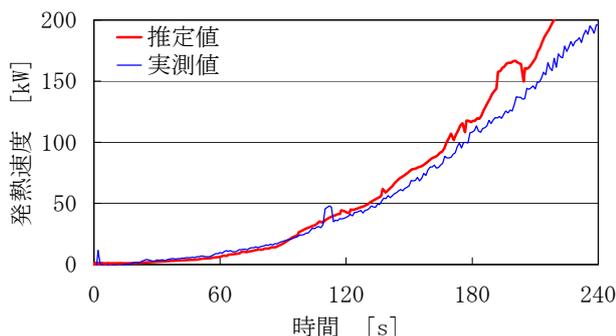


Fig. 17 発熱速度の推定結果
Comparison between Measured and Predicted Heat Release Rates

Table 2は、従来の手法と本手法とのそれぞれにおいて実際の火点と検知した火点との差(検知誤差)を1秒毎に算出し、時間帯毎に検知誤差の平均値を示したものである。また、従来の手法の検知誤差(A)と本手法の検知誤差(B)の差を従来の手法の検知誤差(A)で除した値を改善率として示した。

Table 2によれば、流動時間を考慮した本手法は従来の手法に比べて火災初期の着火後66~120秒において検知精度が30%程度向上する結果となった。また、改善率は時間の経過と共に小さくなるのが分かる。これは、成長火源では火災初期ほど発熱速度が小さく、それに伴い各測定点に至るまでの流動時間の差が流動距離に応じて変動し、その検知精度に与える影響が無視できないためと考えられる。ちなみに、式(20)を用いて120秒の時点(発熱速度39kW)の流動時間 t_{travel} を算出すると、温度センサ①($r=2.8m$)では7秒、温度センサ④($r=6.3m$)では16秒であるので、

温度センサ①と④との流動時間の差は9秒となる。

Fig. 17は、発熱速度の実測値と本手法において3回検知時に推定した発熱速度(推定値)と木材クリブの重量減少速度から算出した発熱速度(実測値)との時刻歴を示したものである。180秒以降は、推定値が実測値より2割程度大きな値を示しているが、180秒以前では本手法によれば発熱速度を精度良く推定できることがわかる。

6. まとめ

本研究では、火災初期において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および火災規模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、以下の知見が得られた。

- 1) 天井流の次元解析式と実験結果との比較によって、火源発熱速度の成長率に依存しない天井流の温度上昇予測式および流動時間予測式が得られた。
- 2) 火災初期の天井流温度上昇について実験結果と予測結果を比較したところ、火災初期の急激な温度上昇も再現できることが分かった。
- 3) 1)で提案した予測式を従来の火点検知手法に導入した結果、火災初期の検知精度が30%程度向上することが明らかになった。

謝辞

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院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) 山口純一, 村岡宏, 小宮英孝: 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, 大林組技術研究所報N0.70, 2006.12
- 2) 中村直人, 細沢貴史, 須川修身, 若松孝旺: 水平高天井下における火災感知器の作動状況, 日本建築学会学術講演梗概集A-2分冊, p.193, 1999年
- 3) G.Heskestad, Heat of combustion in spreading wood crib fires with application to ceiling jets, Fire safety Journal 41, pp343-348, (2006).
- 4) 藤田隆史, 山口純一, 田中哮義, 若松孝旺: 火災プルーム先端の上昇時間に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.502, pp.1-8, 1997年12月
- 5) 須川修身, 細沢貴史, 中村直人, 松原美之, 若松孝旺: 傾斜天井下の気流性状の解明, 日本建築学会学術講演梗概集A-2分冊, p.195, 1999年
- 6) R.L.Alpert, Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol.8, p181-194, 1972
- 7) 新田孝太郎 他: 天井面下の熱気流温度に基づく出火位置予測手法に関する研究(その3), 日本建築学会学術講演梗概集(九州), 2007.8.