

汎用温度センサーを用いた初期火災の感知と火源探査に関する研究

A Study on Detection and Source Probing of Initial Fire by using Common-use Temperature Sensor

建築学専攻 原田研究室 難波真衣

1. 序論

1.1 研究の背景

建物火災の死亡者は毎年 1000 人を超えており、その原因は、逃げ遅れによるものが最多である。¹⁾そのため、火災を早期に関することは避難安全上重要である。消防法令では、感知器の設置基準や仕様が定められている。最も一般的な熱感知器は、設置できる室の条件を広く、かつ、非火災報を減らすために火災規模がある程度以上になってから発報する仕様となっている。しかし、通常の健常者はもちろん、病院や福祉施設等の避難弱者が多い用途の建物では、より早期に火災を感知することができれば火災による死傷者を減らすことにつながる。

また、火災時の火源位置や発熱速度をあらかじめ知ることができれば、火災室外にいる建物管理者や介助要員等による初期消火や避難誘導等を効率的に行うことが期待される。

1.2 既往研究

牧川ら²⁾は、汎用の温度センサーを用いて日常的な温度変動を常時記録し、これからの逸脱した温度変動を異常として検出することで、早期感知が可能になることを示した。しかし、センサーを、火源を含む一軸上にもみ配した区画内火災実験の結果に基づいているため、区画全体の天井流の広がり方や温度変化・風速変化の傾向や火源探査における様々なセンサーと火源の位置関係を検討するための知見が不足している。また、空調吹き出し気流等の日常気流の影響を受け、火災初期の弱い火源からの天井流では到達しない領域があることを示した。しかし、定性的な検討であり、定量的な検討は示されていない。

山口ら³⁾は、無限天井下における火災初期の熱気流性状実験で確認し、これをもとに火源探査の方法を検討した。天井流温度は熱容量の小さい熱電対で測定されており、感知器やセンサーの応答特性は考慮されていない。また、区画内に煙層が形成された場合の天井流温度の上昇についても言及されていない。

1.3 研究の目的

本研究では、牧川²⁾の研究（以下、先行研究という）の成果をふまえて、実規模区画での実験結果をもとに複数の汎用温度センサーを用いた初期火災の感知とともに火源探査の方法を提案すること、実験結果と数値解析から空調吹き出し気流が火災感知に及ぼす影響について検討することの2点を目的とする。

2. 実規模区画での火災実験におけるセンサー温度変化

2.1 実験目的

複数センサーを用いた火源の位置や発熱速度の推定に関する実験（以下、実験①）と空調吹き出し気流の影響を考慮した感知可能範囲の検討に関する実験（以下、実験②）の2種類を行った。

実験①では、火源の位置や発熱速度が天井流の広がり方や煙層が温度変化・風速変化などに及ぼす影響を検討すること、火源の位置や発熱速度とセンサー温度の関係を確認することを目的とし、火源の位置や発熱速度を変化させて実験を行った。また、センサー温度の測定値と後述の予測式による推定値との比較を行う。

実験②では、は空調気流と天井流到達範囲の関係を検討することを目的とし、火源の発熱速度や空調の吹き出し風速を変化させて実験を行う。

2.2 複数のセンサーを用いた火源の位置や発熱速度の推定に関する実験

(1) 実験方法

実験区画は幅・奥行ともに 6500mm、天井高さ 2700mm であり、壁の1つは幅 2900mm・高さ 2100mm の開口を有する。図1左側に実験区画内の写真を示す。各実験で火源を図2中のB、C、Dのうちの1か所に設置した。エタノールを入れた火皿を火源として、火源から発生する天井流温度を測定するとともに、火災時の気流性状を把握するために目視観察を行った。先行研究での区画実験を参考に、本研究では、図2に示すように同じ区画にセンサーを二軸に配して実験を行う。図2中の各測定点の天井下 10mm と 30mm に T 型熱電対(φ0.2mm)を、汎用温度センサーを天井下 30mm に設置し天井流温度を測定した。ここで、用いたセンサーの応答特性は $RTI=70[m^{1/2}\cdot s]$ 、 $C'=0.0003[1/s]$ である。⁴⁾熱線風速計と二方向管を用いて風速を測定した。また、火源の質量減少速度を測定して発熱速度を計算し、図2中の区画の隅角にある h 点と h' 点で気流温度の垂直分布を測定して煙層高さや煙層温度を求めた。



図1 区画の内観と天井下の測定器

表 1 実験①の実験条件

| 実験No. | 設定火源 | 火源高さ | 火源位置 |
|-------|-----------|--------|------|
| 1-1 | 5~8kW程度 | 26.5cm | B |
| 1-2 | | | C |
| 1-3 | | | D |
| 1-4 | 25~35kW程度 | | B |

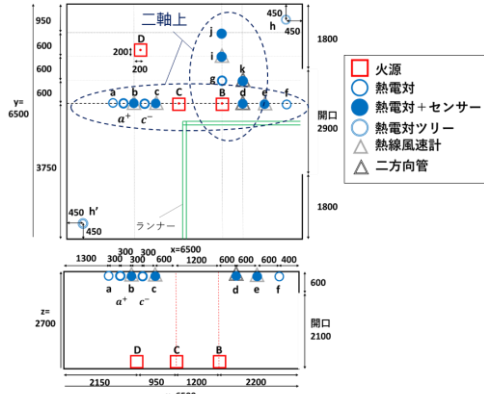


図 2 実験①の区画図面 (単位 : mm)

(2) 実験結果

先行研究と同様に、火源の発熱速度 Q 及び火源とセンサー間の水平距離 r を与えて、渡邊らによる煙層内の天井流温度予測式(1)、Alpertによる天井流流速の実験式(2)、Heskestadらが提案しているRTI-C'モデル式(3)を用いて、センサーの温度応答を推定した。

$$T - T_0 = \left\{ 1 - \left(\frac{Z_d}{H} \right)^{5/3} \right\} (T_s - T_0) + \Delta T_{AL} \quad (1)$$

$$u = \begin{cases} 0.96 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3} \left(\frac{r}{H} \leq 0.15 \right) \\ 0.195 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3} \left(\frac{r}{H} \right)^{-5/6} \quad (0.15 < \frac{r}{H}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T - T_d) - C'(T_d - T_0) \quad (3)$$

ここで、 ΔT_{AL} はAlpertによる天井流温度の実験式であり、次式で求めることができる。

$$\Delta T_{AL} = \begin{cases} 16.9 \left(\frac{Q}{H^{5/2}} \right)^{2/3} \left(\frac{r}{H} \leq 0.18 \right) \\ 5.38 \left(\frac{Q}{H^{5/2}} \right)^{2/3} \left(\frac{r}{H} \right)^{-2/3} \quad (0.18 < \frac{r}{H}) \end{cases} \quad (4)$$

天井流温度上昇値、風速、センサー温度上昇値の着火300s後の測定値と推定値の比較を図3,4に示す。センサーを二軸に配した場合も先行研究と同様に、火源の条件を与えて煙層による天井流の温度上昇を考慮すればセンサーの温度応答予測ができることを確認した。よって、空調がない場合、天井流は同心円状に広がっていると考えられる。また、b, i 点のセンサー温度上昇値の測定値と推定値の時間変化の比較を図5に示す。着火直後の推定値が測定値より大きくなるのは、天井流がセンサーに到達する時間遅れが考慮されていないためと考えられる。

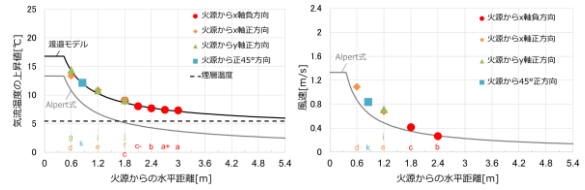


図 3 実験 1-1 の着火 300s 後の天井流温度上昇値 (左側) と風速 (右側)

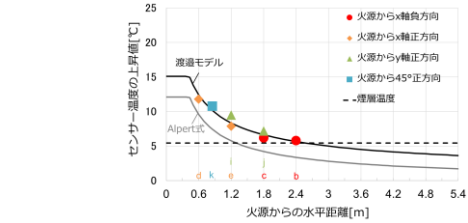


図 4 実験 1-1 の着火 300s 後のセンサー温度上昇値

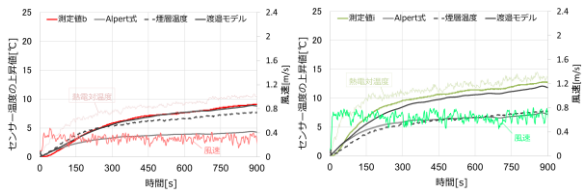


図 5 実験 1-1 のセンサー温度 (左 : b 点, 右 : i 点)

2.3 空調吹出し気流の影響を考慮した感知可能範囲の検討に関する実験

(1) 実験方法

実験①と同じ区画の中央に、図6に示す空調模型を設置し、空調気流を再現して実験を行った。測定器の設置位置について、実験2-1は実験①と同様、図2に示すように、実験2-2から2-5では図7に示すように配した。

表 2 実験②の実験条件

| 実験No. | 設定火源 | 火源高さ | 火源位置 | 吹出風速 |
|-------|-----------|--------|------|--------|
| 2-1 | 5~8kW程度 | 26.5cm | B | 3.0m/s |
| 2-2 | | | A | 1.5m/s |
| 2-3 | | | A | 4.5m/s |
| 2-4 | 25~35kW程度 | | A | 3.0m/s |
| 2-5 | | | A | 0.0m/s |

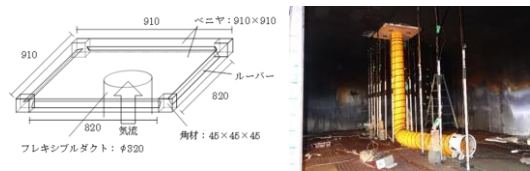


図 6 空調模型 (単位 : mm)

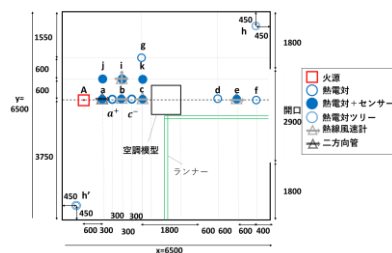


図 7 実験②の区画図面 (単位 : mm)

(2) 実験結果

着火 300s 後の実験 2-4、2-5 と先行研究²⁾の実験 2、3 の火源と空調模型を通る軸上の天井下の天井 30mm の温度分布を図 8 左側に、c 点の天井流温度上昇値を図 8 右側に示す。ただし、実験 2、3 の火源高さは 19cm である。発熱速度が 7kW 程度、吹出し風速 3.0m/s の実験 3 では、空調吹出し口に近い c 点で空調気流により温度が上昇しにくくなっていることが確認できるが、発熱速度が 30kW 程度、吹出し風速 3.0m/s の実験 2-4 では、c 点でも空調気流による明確な影響は確認できなかったため、発熱速度が 30kW 以下では、空調気流の影響を考慮する必要があると考えられる。

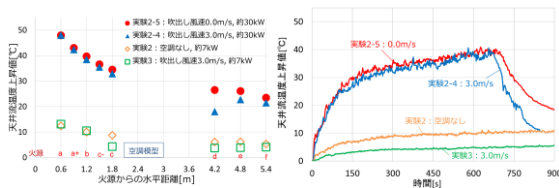


図 8 左：着火 300s 後の天井流温度分布
右：c 点の天井流温度上昇値

3. 火源探査の方法

区画実験から、火源条件と煙層による天井流温度の上昇分（以下、煙層による上昇分）を与えればセンサー温度を推定できることを確認した。本章では、センサーの温度測定値から火源の位置と発熱速度を推定する方法について検討する。

火源条件から式(1)を用いて天井流温度を概ね推定できたが、煙層温度 T_s [°C] と煙層下端高さ z_a [m] が既知でないとセンサー測定値から直接、式(1)を用いて火源探査は行えない。そこで 1 つのセンサーを煙層による上昇分を推定するために使用し、その他のセンサーで探査を行う。ただし、火源から天井までの高さ H [m] を既知とする。

3.1 センサー測定値から煙層の温度を推定する方法

図 9 に示すように、火源から一定以上離れた天井流温度 T は火源からの天井流による影響が小さく、煙層温度 T_s と概ね等しくなる。よって、用いるセンサーのうち、温度測定値 T_d が最も小さいセンサー (=火源から最も遠いセンサー) は天井流の影響をほぼ受けていないものとし次のように煙層と最も遠いセンサーの関係を仮定する。

* $T_s = 0.9T$ [°C], 火源から最も遠いセンサーの設置点の風速 $u_s = 0.3$ [m/s], 火源から煙層までの高さ $z_a = 1.8$ [m] とする。この仮定値について、実際は検出したい火源の規模や室条件を考慮して決める必要があると考えられる。以上のことを踏まえてセンサー測定値から煙層による上昇分を推定する方法を提案する。

1) 温度測定値が最小の測定値 T_d と単位時間当たりの温度上昇量 dT_d/dt と風速 u_s から式(3)を用いて天井流温

度 T を推定する。

2) 天井流温度 T から煙層と最も遠いセンサーの関係の仮定より煙層温度 T_s を推定する。

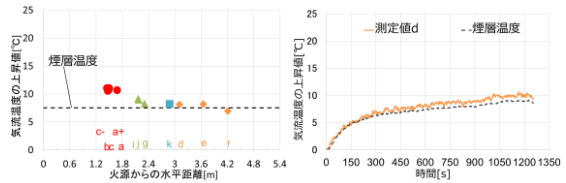


図 9 実験 1-3 の着火 300s 後の天井流温度上昇値 (左) と d 点 ($r=3.11$ m) の天井流温度上昇値 (右)

3.2 センサー測定値を 2 つ用いた火源探査方法

2 つのセンサーのうち温度測定値 T_d が小さい方のセンサーから 3.1 の方法で煙層温度を推定し、もう 1 つのセンサー測定値から式(1), (2), (3)を用いて、火源からそのセンサーまでの水平距離 r [m] と発熱速度 Q [kW] の関係を推定する。図 10 に示すように r がわかればセンサーを中心とする半径 r の円上に発熱速度 Q の火源があると推定できる。

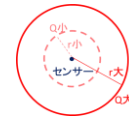


図 10 センサー測定値から推定できる r と Q の関係

3.3 センサー測定値を 3 つ用いた火源探査方法

センサーの温度測定値 T_d が大きい順に、センサー 1、2、3 とし、以下の手順で火源探査を行う。

- 1) センサー 3 の測定値から煙層温度を推定
- 2) 式(1), (2), (3)を用いてセンサー 1、2 のそれぞれで図 11 に示すように同心円を描く。
- 3) それぞれの発熱速度が等しい円の交点をプロットしたものを交点軌跡の近似円と言う。

火源は図 11 に示す交点軌跡の近似円上にあると推定できる。また、発熱速度 Q の最小値は r が最も小さくなる時、すなわち等発熱速度線の交点がセンサー 1、2 を通る直線を内分する時の Q である。同様に、 Q の最大値は r が最も大きくなる時、すなわち等発熱速度線の交点がセンサー 1、2 を通る直線を外分する時の Q である。

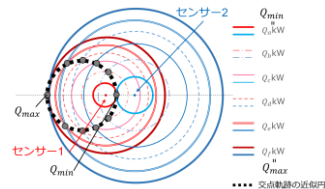


図 11 2 つのセンサーの発熱速度が等しい円の交点

また、センサーの測定値が大きいほど火源に近いと考えられるため、各センサー間の垂直二等分線で区切られた 6 つの領域のうち、火源が位置する領域を特定でき、図 12 に示すように塗りつぶした領域①にあると推定できる。したがって、3 つのセンサーから、火源は

図 12 に示す領域①内にかつ、点線で示すセンサー1, 2の交点軌跡の近似円上にあると推定できる。

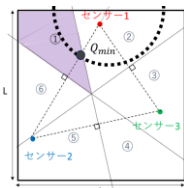


図 12 3つのセンサーから推定できる火源位置範囲

3.4 区画実験における火源探査精度の検討

提案した火源探査方法の精度確認のために、図 13 に示す実験 1-1 の着火 300s 後のセンサー b, d, i の測定値を用いて火源位置と発熱速度の推定を行った。入力値と火源位置範囲の推定結果と実際の火源位置を図 13 に示す 2 つに分かれた円弧上にあると推定できる。区画の大きさが既知であれば、煙層温度の逆算から火源がどちらの円弧上にあるか特定できる可能性や複数の時刻のセンサー測定値を用いることで、火源位置の推定範囲をより特定できる可能性も考えられる。

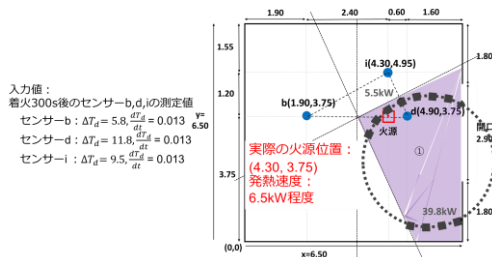


図 13 実験 1-1 の 3つのセンサー測定値からの推定結果

4. 空調吹出し気流が火災感知に及ぼす影響の検討

CFD 解析により先行研究²⁾の実験 2~4 を再現した。いずれも火源位置は図 7 中の A で火源高さは 19cm、発熱速度は 7kW 程度で、実験 2, 3, 4 はそれぞれ空調模型なし、吹出し風速 3.0m/s、7.8m/s である。解析条件を図 14 に示す。解析値は測定値と概ね一致し、その一例として、着火 300s 後の天井下 30mm の火源と空調を通る軸上の温度分布を図 15 の下段に示す。また、着火 300s 後の火源と空調模型を含む鉛直断面の解析結果の等温線を図 15 の上段に、天井下 30mm の水平断面の解析結果の等温線を図 15 の中段に示す。

| | | |
|--------|---|--|
| 解析ソフト | FlowDesigner2017 | |
| メッシュ数 | 約72万メッシュ | |
| 乱流モデル | 標準k-εモデル | |
| 火源サイズ | 0.018m ² (φ15cmの円) | |
| 火源位置 | A | |
| 境界条件 | 初期温度: 15℃ 風量発生面の設定風速: 0~7.8m/s ダクトの直径: 32cm | ダクトの底面に風量発生面 区画の壁と天井の境界条件: 熱貫流率 0.9W/m ² K →周壁への熱損失を再現 |
| 計算スキーム | 1秒刻み | |

図 14 解析条件

ダクト底面の風量発生面の風速の設定値を 0~7.8m/s まで様々に変化させ、各設定風速における着火 300s 後の天井下 30mm の温度分布と風速の x 方向成分を図 16 の上段に示す。天井流と空調吹出し気流の衝突位置は、

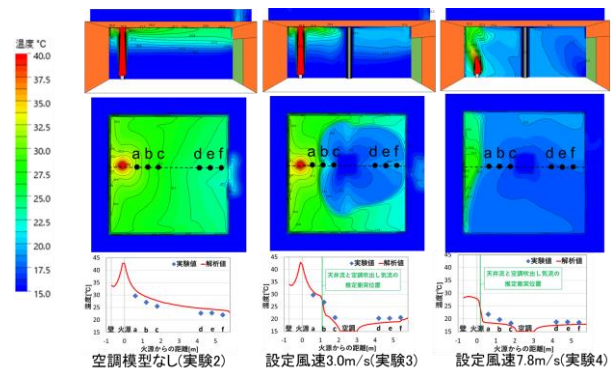


図 15 解析結果: 着火 300s 後の実験 2~4 の天井流温度分布から温度勾配が最大となる点と推定し、風速の水平方向成分については 0 になる点と推定し、火源からそれぞれの推定衝突位置までの距離を実験の目視観察と合わせてプロットしたものを図 16 の左下に示す。この図から、7kW 程度の火源を想定する場合、空調吹出し気流の風速が感知に影響を及ぼす範囲を図 16 の右下のように推定する。

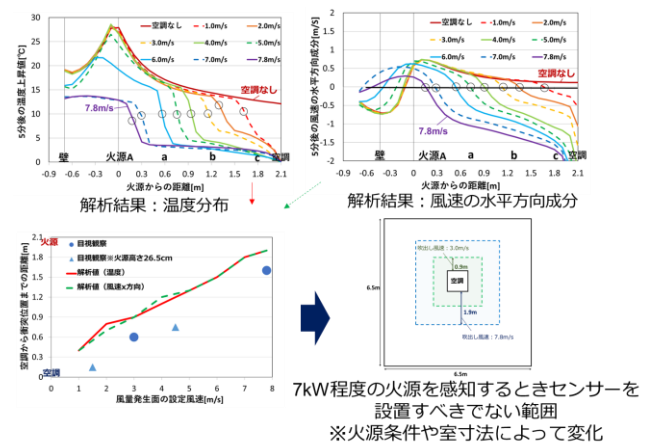


図 16 目視観察と解析結果による、火源から天井流と空調吹出し気流の衝突位置までの距離の推定

5. 結論

複数のセンサーを用いて火源探査を行う方法を検討した。3つのセンサー測定値から、煙層による天井流温度の上昇分を考慮し、火源の位置や発熱速度の範囲を推定する方法を提案し、区画火災実験のセンサー測定値を用いて推定精度を確認した。

また、実規模区画での実験結果及び数値解析により空調吹出し気流が天井流に及ぼす影響について検討した。火源の発熱速度や吹出し風速によって天井流到達範囲が変化すること、天井流の到達範囲を数値解析により概ね再現できることを示した。

【参考文献】1) 平成 29 年度版 消防白書, 消防庁
 2) 牧川真央他: 室空間の使用実態に基づいた火災感知方法の提案, 平成 28 年度修士論文
 3) 山口純一他: 火災初期の火点位置検知手法に関する研究, 大林組技術研究所報 No. 72, 2008
 4) 牧川真央他: 汎用温度センサーの熱気流応答特性, vol. 66, No. 4, 2016
 【謝辞】本研究は、東京理科大学研究推進機構総合研究院共同利用・共同研究「温度センサーを用いた合理的火災感知方法の開発」に基づき実施したものである。ここに、関係各位への謝意を示す。