

空調吹き出し気流が火災初期の天井流に及ぼす影響と早期火災感知への適用に関する研究 A Study on Influence of Air Conditioning Flow to Ceiling Jet in the Early Stage of Fire and Detection of Initial Fire

建築学専攻 原田研究室 藤本航輔

1 研究の背景

火災発生時の人的被害を低減するには早期避難が重要になるが、従来型の火災感知器は熱や煙が発生するまで感知可能な状態にはならず、初期消火が手遅れになる。一方、火災初期であるほど火源から生じる熱気流は弱く、周辺環境の影響を受けやすく感知器の設置条件は限定的となる。

従来の火災感知器よりも早い火災感知を可能にする方法として、牧川¹⁾は汎用の温度センサーを利用して日常的な温度変動を逸脱する温度を火災として検出することで早期感知が可能であることを示した。

天井流拡散の阻害状況の検討について、牧川は実験により空調の吹き出し気流(以下、空調気流)が、火源から生じる天井を沿う熱気流(以下、天井流)と衝突する位置を境界として影響を及ぼさないことを示した。そして難波²⁾は数値流体解析で天井流と空調気流の衝突を再現し、空調気流の影響が小さい温度センサーの設置可能範囲を提示した。また、藤本³⁾は設計実務へ応用できるように、理論式で衝突位置を簡易に推定する方法を提案し、数値流体解析で妥当性を示した。

しかし、衝突位置推定法は実験による検証が行われておらず妥当性の検証が不十分であり、また、空調が送風運転である場合を対象としており、冷・暖房運転する空調の気流の変化を考慮した検討が不足していた。

本研究は空調気流のある空間における熱感知器による早期火災感知を可能にすることを目的とし、実規模実験で空調実機の気流が天井流に及ぼす影響、気流の衝突位置の推定方法の妥当性の検証を行い、さらに空調気流の影響範囲を考慮した熱感知器・温度センサーによる早期火災感知が可能な設置条件を示す。

2 空調気流の天井流への干渉実験

2.1 実験の概要

以下の3つの実規模実験を行う。

- ・ 予備実験1：天井流実験
火源を設置、天井流の温度・流速・気流の流れを測定
- ・ 予備実験2：空調気流実験
空調機の吹き出す気流の流速・厚みを測定
- ・ 本実験：空調気流の天井流への干渉実験
空調が作動した状態の区画に火源を設置、天井付近の温度・流速の測定、天井流を可視化して衝突を測定

2.2 測定点

実験は12m×15m×高さ2.7mの実験区画にて行った。

壁材は厚さ25mmのケイ酸カルシウム板であり、出入り扉が2ヶ所設けられているが実験中は閉鎖した。

天井中央に950mm四方の天井埋め込み型パッケージエアコン(日立 RCI-GP112RSH3)を設置した。各辺に幅480mmの吹き出し口がついており4方向に吹き出す。

図2は本実験で設定した測定点の1例である。測定点は、室中央を東西に横切る軸上(以下、主要軸)の東側を主な測定域として測定点を450mm間隔に設定した。主要軸外の測定点として、区画の南東域(SE)、隅角部付近(NE, SW)にも測定点を設定した。各測定点に、K型熱電対(φ0.32)を①天井付近から床面まで9点温度測定するツリー型、②天井から900mmまで5点熱電対を設置する煙層内型、③天井から300mmまで3点熱電対を設置する天井付近型、④1点測定する天井下30mm型、また⑤空調吸い込み口中央には天井下100,300mmに設置した。他には、指向性風速計を、天井から30mmの水平方向の流速を測定するように最大5台、一部の主要軸上の測定点に設置した。

火源は180mm角のプロパンガスバーナーで、ガス流量を制御し所定の発熱速度となる定常火源を模擬した。

2.3 実験条件

予備実験1は15条件、予備実験2は5条件、本実験



図1：実験区画、設置した空調機

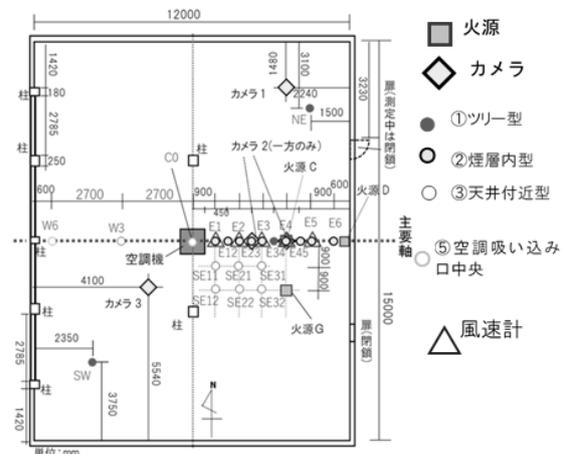


図2：測定点(本実験の一例)

表 1：実験条件 (抜粋)

・ 予備実験 1

実験No.	火源位置	発熱速度	火源高さ
A15	A(中央)	15kW	床

・ 予備実験 2

実験NO.	風速設定	角度	運転設定
W20	弱	20°(カタログ値)	送風
W20C			冷房25°C

・ 本実験

実験NO.	火源設定			空調設定		
	火源位置	発熱速度	火源高さ	吹出風速	吹出角度	運転設定
C15-W20	C(3.6m)	15kW	床	弱	20°	送風
C15-W20C						冷房25°C

は 23 条件実験を行ったが、本梗概では表 1 に示す一部の
実験結果のみ示す。

2.4 予備実験 1：天井流実験

予備実験 1 では、火源着火後 300 秒を温度、流速の
測定時間とし、区画を閉鎖して実験を行った。測定終了
後、区画に立ち入り天井流を発煙片を用いて可視化し
て、気流の観測を行い、終了後に消火した。

図 3 に条件 A15 の結果を示す。火源着火前に隅角部
で測定した低層の温度を平均を初期温度として用い、
測定温度と初期温度の差を温度上昇値とした。着火後
300 秒の温度上昇値の分布では、天井下 30,100mm の温
度上昇値が火源位置を中心として等しく距離減衰し、
天井流が広がっていることがわかった。また天井下
300mm は煙層温度と一致した。そして、式(1)で表され
る渡邊ら⁴⁾による天井流温度の予測式(以下、渡邊式)によ
り、天井流の温度を概ね再現できることが確認できた。

天井付近の流速は 2 点測定したが、火源から離れた
方が小さく、天井流流速の距離減衰が確認できた。そし
て式(3)に示す Alpert ら⁵⁾による天井流流速の実験式(以
下、Alpert 流速式)により、天井流の流速を概ね再現で
きることを確認できた。

2.5 予備実験 2：空調気流実験

予備実験 2 では、空調気流の流速を天井下 30, 100,
300, 900mm の 4 点で風速計を用いて測定し、気流の厚
みをスモークテスターを用いて目視で測定した。

主要軸の鉛直断面における、流速のコンター図を図
4 に示す。条件 W20 では、吹き出し角度 20° であつた
がほぼ天井に沿う流れであつた。一方、空調が冷房運転
である条件 W20C では、吹き出し口から 2m 以上離れ
ると、吹き出しによる慣性よりも負の浮力が大きくなり
天井から離れて降下する流れとなつた。

次に、測定した流速を、空調気流流速の予測式⁶⁾と
比較した。この予測式は、空調気流のコア領域の減衰性
状に応じて、吹き出し口に近い順に第 1 域～第 4 域ま
で分けられて与えられているが、吹き出し口長辺方向
のみコア領域が形成される第 2 域、コア領域がなくな
る第 3 域の流速が、実験の結果を予測できるかを比較

・ 渡邊式 ΔT_{WT} [K]

$$\Delta T_{WT} = \left(1 - \left(\frac{z_a}{H_a}\right)^{5/3}\right) (T_s - T_0) + \Delta T_{AL} \quad \text{式(1)}$$

ただし、 ΔT_{AL} : Alpert らの実験式による天井流温度で、

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

・ Alpert 流速式 u_{AL} [m/s]

$$u_{AL} = \begin{cases} 0.96\left(\frac{Q}{H_a}\right)^{1/3} & (r/H_a \leq 0.15) \\ 0.195\left(\frac{Q}{H_a}\right)^{1/3} \left(\frac{r}{H_a}\right)^{-5/6} & (0.15 < r/H_a) \end{cases} \quad \text{式(3)}$$

Q : 火源発熱速度[kW]、 r : 火源からの距離[m]、 z_a : 火
源から煙層下端までの高さ[m]、 H_a : 火源から天井まで
の高さ[m]、 T_s : 煙層温度[K]、 T_0 : 周囲空気温度[K]

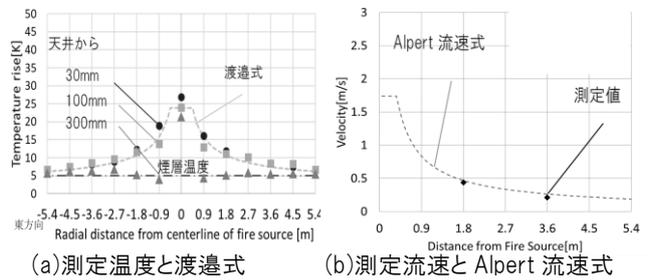


図 3：天井流の温度、流速と予測式の比較

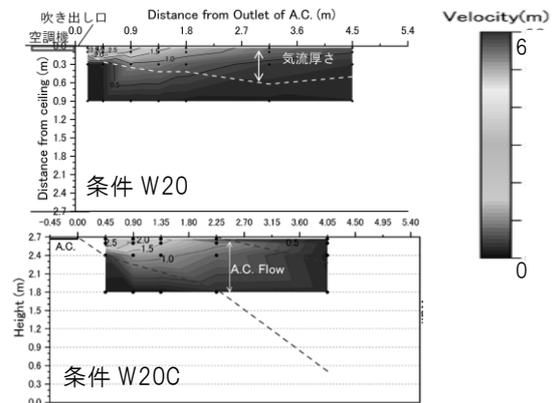


図 4：主要軸断面の空調気流の流速コンター図

・ 空調気流流速の予測式

・ 中心軸流速 V_x ・ 流速分布 V_r

$$\frac{V_x}{V_0} = \sqrt{\frac{KD_0}{mX}} \quad \text{式(4)}$$

$$\frac{V_r}{V_x} = \exp\left(-\frac{\pi}{2} \left(\frac{K \cdot r}{X}\right)^2\right) \quad \text{式(5)}$$

第 2 域

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{KD_0}{X} \quad \text{式(6)}$$

$$\frac{V_r}{V_x} = \exp\left(-2\left(\frac{K \cdot r}{X}\right)^2\right) \quad \text{式(7)}$$

V_0 : 吹き出し風速[m/s]、 m : 吹き出し口のアスペクト[-]

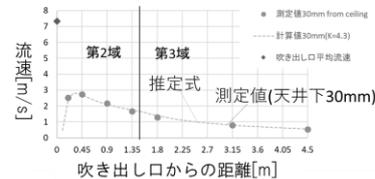


図 5：測定流速と空調気流流速予測式と比較

した。第2、3域それぞれにおける、吹き出し口から距離 X [m]における中心軸流速 V_x [m/s]と、中心軸からの距離 r [m]における流速 V_r [m/s]の計算式を式(4)~(7)に示す。このとき、吹き出し口定数 K [-]は長方形吹き出し口の場合の標準値⁹⁾である4.3を与えた。また、吹き出し口の有効直径 D_0 [m]は吹き出し口の縮流を表す係数に依存するため、予測結果と実験結果を比較しながら縮流係数を修正した。

条件 W20 の気流は天井に沿う気流であったため、中心軸が天井面にあると仮定し、天井から 30mm の流速 V_r を計算し、実験結果と図 5 で比較すると、空調気流流速の推定式によって実験結果を再現できた。

2.6 本実験：空調気流の天井流への干渉実験

本実験では、空調気流が安定して作動している状態から実験を開始し、火源着火後 300 秒を温度、流速の測定時間とし、区画を閉鎖して実験を行った。測定終了後、区画に立ち入り天井流を発煙片を用いて可視化して、気流の観測を行い、終了後に消火した。

条件 C15-W20 の目視観察結果は図 6 左で、火源からほぼまっすぐプルームが上昇し、天井に到達すると天井流が同心円状に広がったが、空調気流と衝突し、拡がりやが阻害されることが確認できた。図 7 に示す着火後 300 秒の温度上昇値を表した天井 30mm の水平断面、主要軸鉛直断面のコンター図では、空調気流により天井流が広がらない範囲の温度上昇が小さくなった。

次に、空調が冷房である条件 C15-W20C と比較すると、図 6 右の目視観察では冷房の場合でも、天井付近の衝突位置はほとんど変化がなかった。図 8 の温度上昇値のコンター図では、温度上昇値が低い範囲に空調気流が流れていることが明確に分かるようになり、また温度上昇が大きい天井流の広がる範囲の温度上昇値が、送風時と比べると 5K ほど低下した。しかし、温度の分布傾向は似通っており、これは鉛直断面の温度上昇値分布から火災プルームに直接当たる空調気流の温度が低くなったことで天井流の温度が下がり、天井流の性状に定性的な変化がないことが考えられる。

3 衝突位置の推定法の妥当性検証

向かい合う天井流と空調気流が衝突する位置では、それぞれの気流のもつ運動量を打ち消しあうことが考えられるが、密度差を無視すると、双方気流の流速を打ち消しあう位置に相当すると考えられる。よって、別個に導出した天井流と空調気流の流速が一致する位置を衝突位置として推定できると藤本³⁾は提案した。

天井流の流速を Alpert 流速式 (式(3)) で、空調気流の流速を空調気流流速予測式 (式(4)~(7)) で表し、図 9 のように向かい合うよう流速分布にプロットすると、交点が流速を打ち消しあう点となり、推定の衝突位置として求まる。条件 C15-W20 について行った結果、

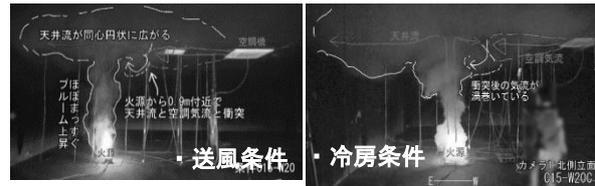


図 6：天井流と空調気流の衝突

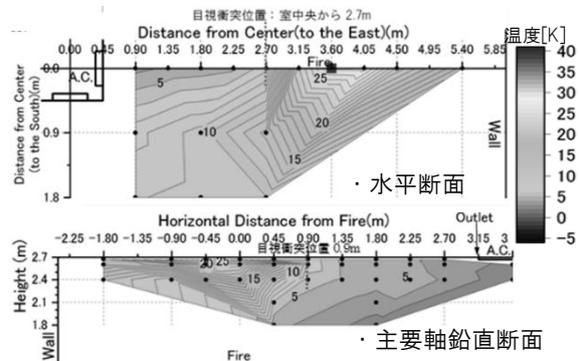


図 7：温度上昇値コンター図(条件 C15-W20)

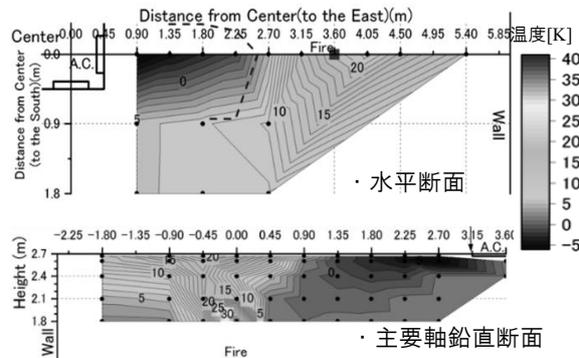


図 8：温度上昇値のコンター図(条件 C15-W20C)

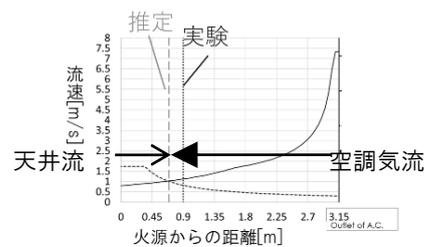


図 9：衝突位置の推定 (条件 C15-W20)

点線で示した実験結果と概ね一致し、衝突位置推定法は実験的に妥当であることが示された。

4 空調気流が優勢な範囲の推定

空調気流が優勢な範囲(以下、空調気流域)を推定できると、天井流が到達できず感知器を設置できない範囲がわかる。図 10 上図のように本実験の一部条件で記録した天井を見上げて気流の衝突を観察したカメラ映像を用いて、空調気流域の境界を測定すると、測定対象とした実験でいずれも境界が二次関数的に分布していた。吹き出し口から衝突位置までの距離 L_{bo} [m]、吹き出し口からの距離 X [m]、中心軸から空調気流の幅方向の距

離 Y [m]として、空調気流域の境界を二次関数

$$L_{bo} - X = aY^2 \quad \text{式(8)}$$

の形に近似した。求められた放物線を温度上昇値コンターにプロットすると、図 10 下図のように境界位置で温度勾配が大きくなり、空調気流域の境界を二次関数で表現することができた。

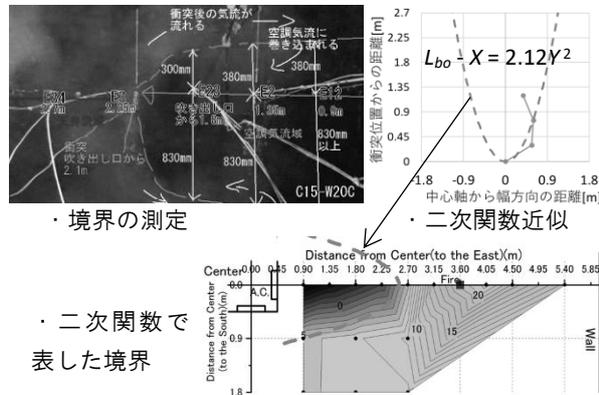


図 10：気流幅の測定と二次関数近似(条件 C15-W20C)

5 感知器の設置位置、発報時間の推定

一般的な居室を想定して、図 11(a)の室を 4 分割した 4m 四方の破線内を対象として 50kW の定常火源を感知することを目的とする。空調は条件 W20 と同様の気流を任意の方向に吹き出すことが可能であるとする。

感知器が設置できない範囲は、最大となる空調気流域を推定すればよく、これは吹き出し口から最も離れた隅角に火源が生じる場合であり、3 節の方法で衝突位置を推定すると、室中央から 3.87m となった。空調気流域を大きく見積もり円で表すとすると、室中央を中

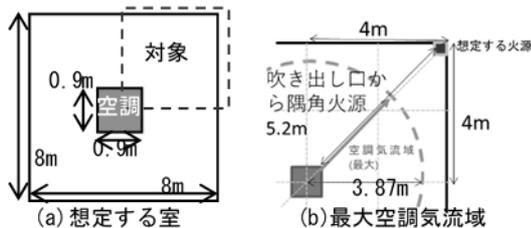


図 11：想定する室、最大の空調気流域の推定

表 2：感知器の感知基準、応答係数

感知器	感知基準	応答係数	
		RTI[m^(1/2)・s]	C'[1/s]
定温式スポット型感知器	60°Cに到達	15	0.02
差動式スポット型感知器	初期状態から13.4K上昇	15	0.02
温度センサー	初期状態から8K上昇	70	3.0×10 ⁻⁴

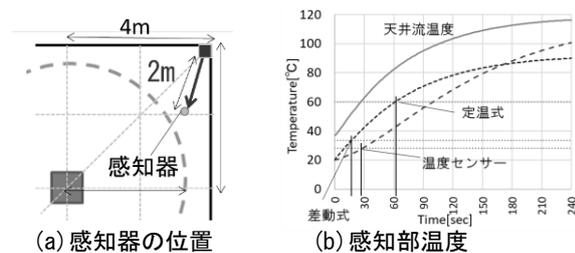


図 12：感知部温度と発報時間の推定

心とした半径 3.87m の円が感知器を設置できない範囲であると表せた。

次に、設置範囲に従って感知器を設置したところ、火源との距離が 2m であったとする。この場合に、感知器に到達する天井流温度を渡邊式(式(1))、流速を Alpert 流速式(式(3))で推定し、式(9)で表される Heskestad による RTI-C' モデル⁷⁾を用いて感知器の応答を加味した感知部温度 T_d を予測する。

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_g - T_d) - C'(T_d - T_0) \quad \text{式(9)}$$

T_g : ガス温度[K]、 u : ガス流速[m/s]、 T_0 : 初期温度[K]、 RTI : 応答指数[$\sqrt{m} \cdot s$]、 C' : 伝熱係数[1/s]

初期温度 20°C として、表 2 に示す 3 種類の感知器について感知部温度が感知基準を超える時間を求めると、縦実線で示す発報時間は差動式感知器が最も早かったが、定温式感知器は温度センサーよりも時間を要し、差動式感知器を設置できない場所では温度センサーを用いた早期感知の可能性が示された。

6 結論

空調気流のある空間における熱感知器による早期火災感知を可能にすることを目的とし、実規模実験で空調実機の気流が天井流に及ぼす影響、気流の衝突位置の推定方法の妥当性の検証を行い、空調気流の影響範囲を考慮した熱感知器による早期火災感知が可能な設置条件を示した。実規模実験により天井流と空調気流の衝突を測定し、推定方法が実験的に妥当であると検証できた。冷房の気流は天井流温度を下げるが、定性的には送風時と変わらないことがわかった。そして、空調気流域が二次関数で推定でき、感知したい火源に対し最大の空調気流域を推定することで感知器が設置できない範囲を提示でき、感知器の発報時間を予測できた。

参考文献

- 1) 牧川真央、空間の使用実態に基づいた火災感知方法の提案、京都大学大学院工学研究科、平成 28 年度修士論文
- 2) 難波真衣、汎用温度センサーを用いた初期火災の感知と火源探索に関する研究、京都大学大学院工学研究科、平成 29 年度修士論文
- 3) 藤本航輔、温度センサーを用いた火災感知に及ぼす空調吹出し気流の影響に関する研究、京都大学、平成 30 年度卒業論文
- 4) Watanabe, J. et al., A Formula for Prediction of Ceiling Jet Temperature in Two Layer Environment, Proceedings of the Seventh International Symposium on Fire Safety Science, pp.431-442, 2003
- 5) Alpert, R. L., Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol.8, pp.181-195, 1972
- 6) 空気調和衛生工学会、空気調和・衛生工学便覧第 14 版 3 巻 空気調和設備編、平成 22 年
- 7) Heskestad, G., and Smith, H. F., Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test: The Plunge Test, Factory Mutual Research, FMRC Serial No.2248SRC 76-T-50, 1976.