

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

■ 研究成果概要報告書

研究課題		温度センサーを用いた合理的火災感知方法の開発	実施年度 平成 29 年度
研究代表者	所属	京都大学工学研究科・教授・博士（工学）	
	氏名	原田 和典	
	問合せ先メールアドレス	harada@archi.kyoto-u.ac.jp	
受入担当責任者	氏名	松山 賢 教授	
1. 研究の背景および目的 <p>建築物等の火災感知では、熱感知器、煙感知器などの規格品を永らく用いてきた。これらの機器は、製品としての信頼度は高く、火災性状が特定できれば確実に作動する。しかし、建築物で起こる火災は多様であり、感知器が想定した通りの火災が起こることは希である。また、建物の実際の使用状況を考えると、調理器具、暖房器具、エアコンなどの日常使用機器から生じる熱気流がある。そのため、感知器の感度をむやみに高くすると非火災報の頻度が高くなり、折角の感知システムも使い物にならない。そもそも、感知器は火災が起こってから発報する仕組みなので、火災が始まる前の状況を考慮して非火災報を排除することは難しい。</p> <p>一方、空調等の計装技術の進歩により安価な温度センサーが使えるようになってきた。これにより、火災と非火災の温度変動パターンを識別できれば、感知の確度が飛躍的に向上すると期待される。本研究では市販の汎用温度センサーの応答特性を踏まえて、火災感知へ利用する可能性を検討するため、室内での小規模火源（可燃物）を燃焼させた時の温度変化を温度センサーで測定し、温度変化から火源の発熱速度と位置を推定して火災を判別することを試みる。</p>			
2. 利用施設及び利用日 <ul style="list-style-type: none">消火設備実験室 （2017年11月6日～11月9日）			

3. 実験方法・研究成果、および考察（申請時の計画に対する達成度合いも含む）

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

昨年度は、消火設備実験室を利用して、エタノール及びウレタンフォームを火源とし、天井下を流れる火災気流の温度変化を熱電対と温度センサーそれぞれで測定することで、火災気流の温度変化に対する温度センサーの応答性状を調べた。スプリンクラー応答予測で広く用いられている RTI-C' モデルと渡邊らによって提案された煙層内における火災気流の温度予測式を組み合わせることで、実験結果をよく再現でき、火源の発熱速度や火源と温度センサーの水平距離が既知である場合に、温度センサー測定値を推定できることを確かめた。また、一部の条件では空調の吹き出しを再現した実験も行い、小さな火源では吹き出し口付近まで火災気流が到達しない現象も確認した。

今年度は、火源の発熱速度だけでなく火源位置も推定することを目的として、下記内容の実験を実施した。成果の一部は、日本火災学会研究発表会（平成 30 年 5 月 29～30 日）および第 11 回アジア・オセアニア火災科学シンポジウムにて公表する予定である。

1) 火源探査に関する実験

複数の温度センサーの測定値から火源位置と発熱速度を推定する方法を検討するため、室内における火源の位置や大きさを変え、実験区画内の天井直下に配置した温度センサーの応答性状を測定した。温度測定値を用いて火源の発熱速度と位置を推定する方法を検討し、実験値から火源を推定し、その精度を検討した。

2) 空調吹き出しによる天井流障害に関する実験

空調の吹き出し口を実験区画内で再現し、火災前から生じている気流により火災気流が押し返されて感知が妨げられる範囲を特定するための実験を実施した。

いずれの実験も、昨年度の成果をふまえ、測定点を増加させ、より詳細な測定を行ったものである。これらの結果は、早期火災感知による火災室からの迅速な避難だけでなく、火災室内の火源探査を行うことで火災室外からの適切な避難介助や避難誘導、消防隊の進入経路の選択等に寄与するものと期待できる。

3. 1 火源探査に関する実験

【火源探査の方法】

昨年度、火源の発熱速度 Q [kW] 及び火源とセンサー間の水平距離 r [m] を入力とし、Watanabe らの煙層内天井流温度予測式¹⁾、Alpert の天井流流速予測式²⁾ で天井流の性状を予測した上で RTI-C' モデル³⁾ を用いることで、センサー温度 T_d [°C] 及び温度上昇率 dT_d/dt [°C/sec] を推定できることを示した。従って、推定手順の前後を入れ替え、センサー温度 T_d [°C] 及び温度上昇率 dT_d/dt [°C/sec] を入力として、火源の発熱速度 Q [kW] 及び火源とセンサー間

の水平距離 r [m] の推定できると考えられるが、その過程で次の 2 点を解決する必要がある。

- ・発熱速度が未知であるため、煙層の温度、下端高さが不明となり、煙層内の天井流温度を予測できない。
- ・求めるべき未知数が火源の発熱速度 Q [kW] 及び火源とセンサー間の水平距離 r [m] の 2 つであるため、センサーが 1 つの場合にはそれぞれの値が一意に決まらない。

そこで、センサーを複数個（本研究では 3 個）設置すること、及び、火源から天井までの距離 H [m] は室の天井高さに等しいものと仮定することを前提条件として、以下の方法で火源探査を行う。

煙層温度 T_s [°C] はセンサーで直接測定できる物理量ではない。そこで、昨年度の実験で得られた、火源から一定以上離れると天井流温度は煙層温度とほぼ等しくなる（図 1）との知見に基づき、3 つのセンサーのうち、温度 T_d が最も低いセンサーを火源から最も遠いセンサーとして、そのセンサーで測定された温度から RTI-C' モデルにより天井流温度を推定し、これが煙層温度に等しいものとする。この際、センサー近傍の天井流の流速 u は 0.3m/s と仮定した。

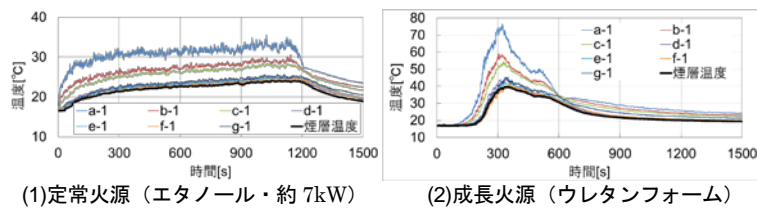


図 1 昨年度の実験結果（天井流温度と煙層温度）

次に、残り 2 つのセンサーの測定値から火源の発熱速度 Q と火源-センサー間の水平距離 r の関係を求める。一組のセンサー温度 T_d 、温度上昇率 dT_d/dt からは、一組の r と Q の関係式が求まる。従って、2 つのセンサーの測定値から得られる二組の r と Q の関係式を用いて、センサーと火源の相対的な位置関係を求めた。ただし、このとき、煙層下端高さが必要となるが、初期火災であることを勘案して 1.8m とした。図 2 に示すように、任意の発熱速度に対して、2 つのセンサーからの水平距離 r_1 、 r_2 をそれぞれ決めることができ、これらとセンサー間の距離 d_{12} から火源の位置を推定することができる。ただし、 $r_1+r_2 < d_{12}$ となる場合や $r_2-r_1 > d_{12}$ となる場合には解は存在しない。発熱速度を変化させて火源位置をプロットすると円形となる（以降、火源位置推定円という）が得られる。

また、センサーでの測定温度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 つの領域のうちのいずれかに火源が位置することが特定できる。図 3 に示すように、3 つのセンサーが設置されている区画内において、センサー温度が高い順にセンサー 1 > センサー 2 > センサー 3 である場合、網掛け領域①にあると推定で

きる。

従って、センサー 3 の測定温度から煙層温度を推定し、センサー 1 とセンサー 2 を用いて火源位置推定円を描けば、火源位置を概ね推定することができる。また、火源位置が決まることで発熱速度も推定できる。

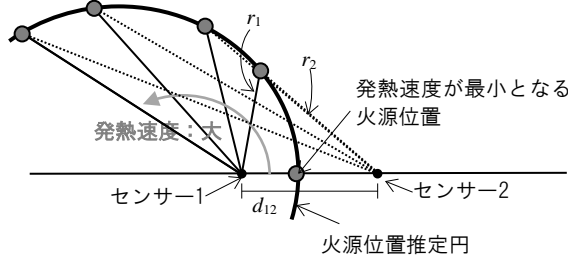


図 2 火源位置の推定

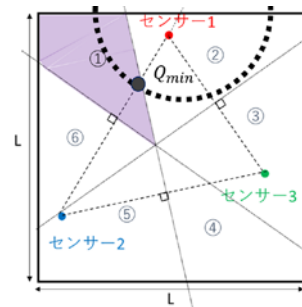


図 3 センサー配置による火源位置領域

【実験による精度確認】

上記の推定方法の精度確認するため、昨年度と同じ区画にて実験を行った。実験レイアウトを図 4 に、実験条件を表 1 に示す。天井直下に T 型熱電対 ($\phi 0.1\text{mm}$) 及び汎用温度センサー (日置電機製温湿度ロガー LR5001) を設置するとともに、区画内隅角部付近 2 か所に煙層温度測定用の熱電対ツリー設置した。

火源には定常火源として直径 15cm と約 20×30cm のアルコールパンでエタノールを燃焼させ、ロードセルにより測定した質量減少速度から発熱速度に換算した。発熱速度はそれぞれ約 7 kW、35kW であった。用いたセンサーの応答特性は $RTI=70[\text{m}^{1/2}\text{s}]$ 、 $C'=0.0003[1/\text{s}]$ である⁴⁾。

表 1 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

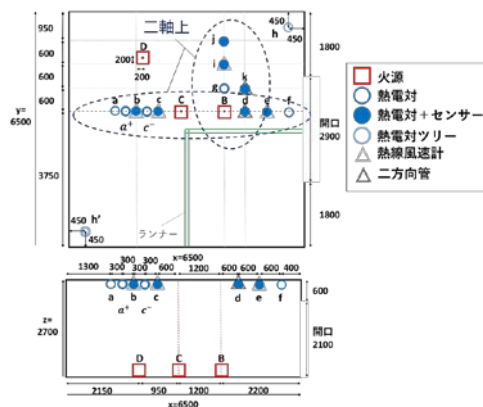


図 4 実験レイアウト (単位 : mm)

実験で測定されたセンサー温度を用いた火源探査の一例として、実験 1-1 におけるセンサー b、d、i の測定値を用いた着火 60 秒、120 秒、180 秒後の火源位置推定を図 5 に示す。着

火 60 後をみると、センサー位置で分割した領域内に火源位置推定円が全て含まれている。このとき、推定される発熱速度は 5~31kW の範囲であり、火源位置や発熱速度を推定したとは言い難い。しかし、時間が経過し、センサー温度が高くなるにつれ、火源推定円の直径は大きくなり、着火 120 秒後では火源推定円は 2 つの部分で、着火 180 秒後では一部のみが領域内に切り取られる。火源推定円は時々刻々変化するが、いずれの時間でも、実験で設置した火源付近を通っている。

以上より、火源位置の推定を時間経過とともに繰り返すことにより、それぞれの時間での火源推定円が近接する付近が火源位置であると推定できる。また、各時刻で火源推定円の近接する部分から発熱速度を推定すると概ね 5~6kW であり、実験値よりわずかに小さいが、良好な推定精度を示している。

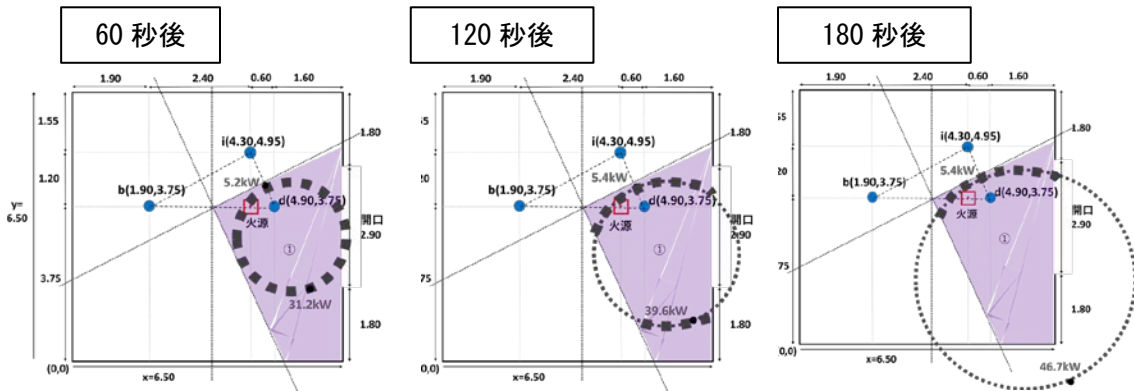


図 5 実験 1-1 における推定結果

3. 2 空調吹き出しによる天井流障害に関する実験

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。変圧器により吹き出し風速を調整した。測定位置については、表 2 および図 7 に示すように火源位置に応じて変更した。

表 2 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

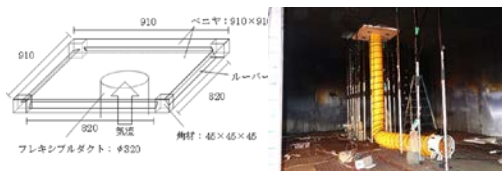


図 6 空調模型 (単位 : mm)

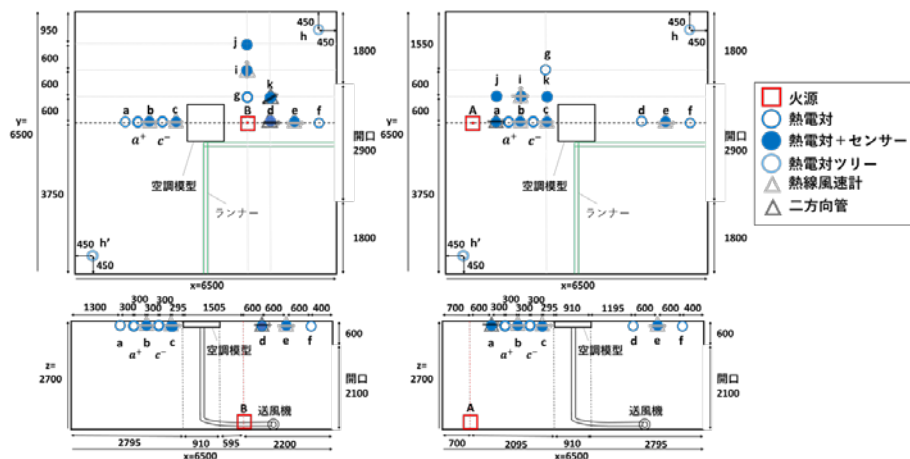


図7 実験②の区画図面 (単位: mm)

図8に実験2-2、2-3における火源からの距離に対する天井流温度の測定結果を示す。図中には、比較のため渡邊ら(式(1))及びAlpert(式(2))による天井流温度予測式を合わせて示している。なお、空調模型の端部は火源から2,095mmの位置である。吹き出し風速が小さい場合は、おおむね渡邊の予測式と測定値が一致しているが、吹き出し風速が大きくなると、空調模型付近の温度が渡邊の予測式を下回っており、天井流が空調吹き出しに阻害されていることがわかる。

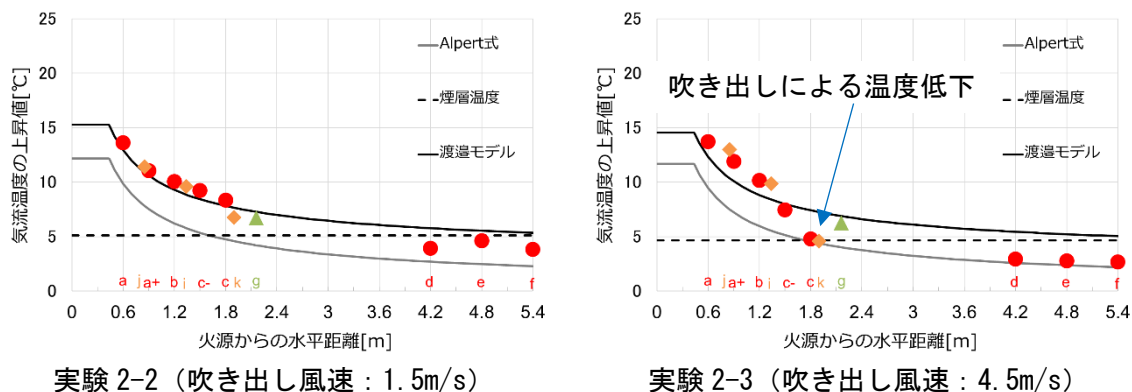


図8 空調吹き出しによる天井流温度の変化 (着火後180秒)

昨年度及び本年度の実験条件において、CFD解析により区画内の気流性状を再現し、区画内天井付近の温度・流速分布を計算するとともに、空調吹き出し気流の到達範囲を求めた。

図9に火源の発熱速度が7kWの場合の火源と空調模型を含む軸上における天井面直下の温度分布及び風速分布を示す。温度分布は空調の吹き出し気流が大きくなるにつれ、温度が急激に低下する位置が火源側に映っており、最も温度勾配が大きい位置を天井流と吹き出

し気流の衝突位置とした。風速分布も同様の傾向を示すが、こちらは風速の正負（火源から空調模型への方向が正）が逆転する位置を衝突位置とした。これらと実験での目視結果と比較したものを図 10 に示す。CFD 解析による温度分布、風速分布から求めた衝突位置の結果は一致しており、ともに風速と衝突位置は正の相関を示している。一方、目視結果は、解析結果から求めた衝突位置よりも小さな値となっており、これは空調吹き出し気流の下側に可視化した煙が流れ込んだためだと考えられる。しかし、吹き出し風速に対する衝突位置の勾配は CFD 解析の結果と目視結果によるものとで一致しており、解析結果に一定の妥当性があることを示している。以上より、空調気流による天井流の阻害範囲は CFD 解析において面風速を適切に与えて計算しておけば妥当な評価になるといえる。例えば、3m/s の空調吹き出しがある空間において、7kW の火災が発生した場合、空調吹き出し口から 0.9m の範囲には天井流が阻害されるので、火災感知のための温度センサーは設置できない。

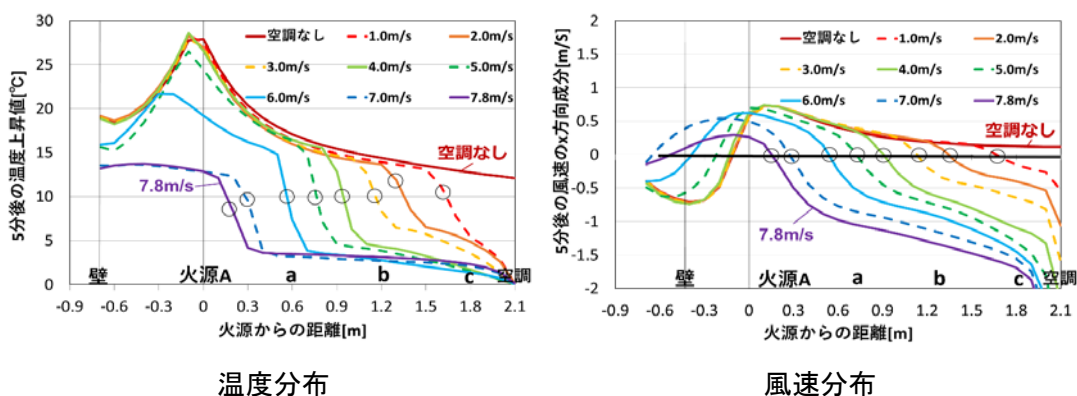


図 9 CFD 解析による天井面直下の温度・風速分布（発熱速度 7kW）

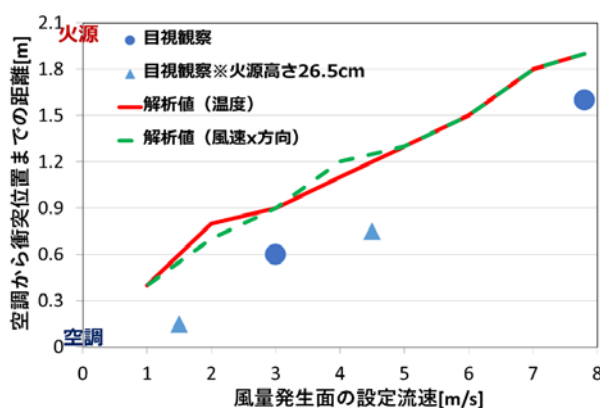


図 10 目視観察と解析結果による気流の衝突位置の比較

まとめ

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) Watanabe, J. *et. al.*, A Formula for Prediction of Ceiling Jet Temperature in Two Layer Environment, Proceedings of the 7th International Symposium of Fire Safety Science, 431-442, 2003
- 2) Alpert, R. L., Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, Fire Technology, Vol.8, pp.181-195, 1972
- 3) Heskestad, G. and Bill, R.G., Modeling of thermal responsiveness of automatic sprinklers, Proceedings of the 2nd International Symposium of Fire Safety Science, 603-612, 1989
- 4) 牧川真央他, 汎用温度センサーの熱気流応答特性, 平成 28 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.100-101, 2016

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

汎用温度センサーを用いて早期に火災感知するとともに、火災室内での火源探査を行う方法を示した。特に、病院や老人福祉施設のように避難に時間を要する建物において、入居者だけでなく介助要員も含めて迅速な初期行動を促すことができる。また、本研究では空調からの吹き出し気流の影響を CFD 解析で検討しているが、より簡易に予測するための代数式等を提案することができれば、成果の普及が促進されると考えられる。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

- 1) 仁井大策、難波真衣、原田和典、松山賢、田中哮義：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その3）汎用温度センサーを用いた初期火災の火源探査、平成30年度日本火災学会研究発表会概要集、2018.5
- 2) Nii D., Namba M., Harada K., Matsuyama K. and Tanaka T., Application of Common-use Temperature Sensors to Early Fire Detection, the 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2018(採択・発表予定)

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
突っ張りスタンド (14本)	23,263	旅費	117,660	該当なし	0
漏煙試験用発煙片 (1箱)	58,320	宿泊費	30,000		
工業用エタノール	31,762				
温湿度ロガー/センサー一式	83,160				
熱線風速計 (2台)	125,939				
小計	322,444	小計	147,660	小計	0
東京理科大学 負担分 総計 470,104円					
消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)

資材運搬費	46,796	旅費	0	該当なし	0
実験資材（ステンレスバットなど）	9,800				
小計	56,596	小計	0	小計	0
京都大学 負担分 総計 56,596 円					

※スペースが足りない場合はページを増やしても構いません。

※上記5に記載された成果公表については、別刷1部をご提出願います。PDFファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告としてWeb等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。（フォーマットは問いません。）

※後日開催予定の成果講評会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。（学内での報告に使用）