

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 28 年度
研究代表者	所属	京都大学	
	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	
<p>1. 研究の背景および目的</p> <p>建築物等における火災感知では、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、火災の条件が明確であ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。一方、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り、温度もしくは煙濃度が十分に高くなってから作動する仕組みなので、火災が始まる前の状況を考慮して火災と非火災の判別をすることができない。</p> <p>一方で、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。これを用いて日常的な温度測定（監視）を行い、日常時と火災発生時の温度変動パターンを識別できれば、火災感知の確度が飛躍的に向上することが期待される。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測定し、温度から火源の発熱速度を推定して火災を判別することを試みる。また、代表的な日常気流として、エアコンの吹き出し気流を選び、吹き出し気流存在下での温度センサーの応答を測定した。</p>			
<p>2. 利用施設及び利用日</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 火災実験用実大区画 （2016年11月7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）

【実験方法】

火災実験用実大区画にて、小規模火源から発生する熱気流性状と汎用温度センサーの応答性状を把握するための実験を実施した。

火災実験用実大区画の天井直下に 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、区画内隅角部付近に煙層温度測定用の熱電対ツリーを設置した（図 1 及び写真 1、写真 2）。また、申請時の計画には含まれていなかったが、火源規模が小さい初期火源では空調等の日常気流の影響を強く受けることが予想されるため、区画中央に空調機からの吹き出しを再現するための模型（以下、空調模型）を設置し、送風機の回転数により吹き出し風速を制御した。

火源には定常火源として直径 15cm のアルコールパンでエタノールを燃焼させたほか、成長火源として $40 \times 40 \times 5\text{cm}$ のポリウレタンフォームを 3 枚重ねたものを燃焼させた。質量減少速度から換算した発熱速度はそれぞれ約 7kW、約 70kW（ピーク時）であった。実験は火源の位置・床面からの高さ及び空調模型からの吹き出し風速を変えて表 1 に示す 7 条件で行った。火源位置は、奥壁付近（図 1 の記号 A）と室中央手前（同、B）とし、火源高さは床上 19cm と 72cm の 2 種類とした。

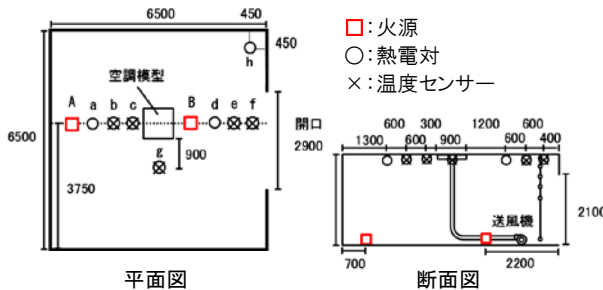


図 1 実験時センサー等配置図



写真 1 区画内の様子

表 1 実験条件

実験 No.	設定火源	火源高さ [cm]	火源位置	吹出風速 [m/s]	初期温度 [°C]
1	エタノール $\phi 15\text{cm}$ (360mL)	72	A	—	15.6
2			A	—	16.8
3		19	A	3.0	16.4
4			A	7.8	17.0
5			B	3.0	15.7
6			B	0.0	16.8
7	ウレタン	33cm	A	—	17.0



写真 2 測定センサー

【実験結果】

図 2 及び図 3 にそれぞれ定常火源（実験 2）、成長火源（実験 7）での実験結果の例を示す。図 2、3 の上段に示す熱電対（天井下 1cm）で測定した熱気流（以下、天井流）温度の時間変化を見ると、火源に近い a～c 点では火源に近いほど温度上昇が大きい、d～g 点での温度は煙層温度との差はほとんどなく、火源中心軸からある一定距離以上離れると、天井流が煙層を巻き込んで温度差が小さくなる。次に、図 2、3 の下段に示すように測定点 b 及び e におけるセンサーで測定した温度をみると、火源に近い測定点 b でのセンサー温度の上昇は、点火直後は天井流に比べてある程度遅れるが、時間経過とともに徐々に天井流温度に近づく。一方、測定点 e では点火後から火勢が減衰するまで常にセンサー温度は天井流温度を下回る。これは、火源から離れた点では天井流の流速が小さくなり、センサー感熱部への対流熱伝達率が小さくなったためと考えられる。

写真 3 に吹き出し気流を生じさせた実験 3 及び実験 4 における熱気流を発煙片で着色した際の測定点 a～c 点付近の様子を示す。空調吹き出し風速が 3.0m/s の場合（実験 3）は、煙層内に空調模型から吹き出された気流による無色の領域ができ、空調気流の先端が測定点 a の手前まで到達している。一方、吹き出し風速 7.8m/s（実験 4）では天井下で空調気流による煙層が攪拌され、薄く着色された煙が確認できる。また、図 4 に写真 3 の範囲内にある測定点 a～c での初期温度からの温度上昇値を示す。測定点 a では、吹き出し風速 3.0m/s での温度は無風時（実験 2）とほぼ等しく、空調気流の影響はほぼ無い。一方で、吹き出し風速 7.8m/s になると時間的変動が大きく、天井流と空調気流が衝突し、乱れが大きくなっている。測定点 c では吹き出し風速 3.0m/s でも空調気流が到達し、温度が低くなっている。

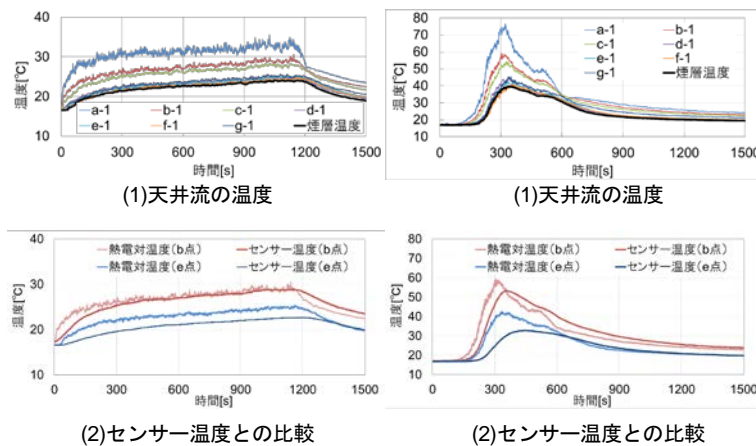


図 2 実験結果（定常火源：実験 2）

図 3 実験結果（成長火源：実験 7）



(1)吹き出し風速 3m/s : 実験 3



(2)吹き出し風速 7.8m/s : 実験 4
写真 3 天井流と空調気流の様子

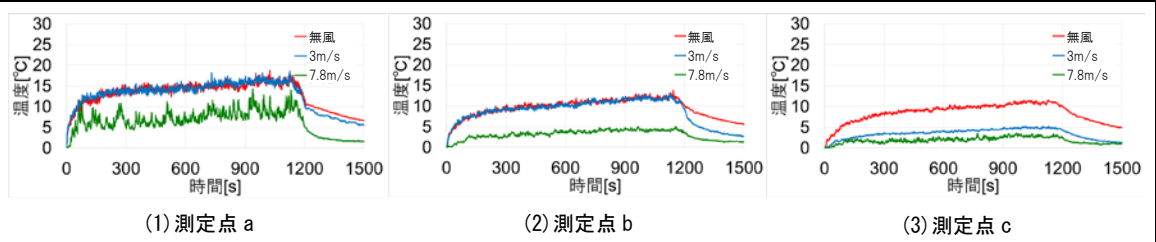


図4 天井付近の温度上昇値（空調からの吹き出しの影響）

【考察】

以上の結果のうち、空調気流が無い場合について感温部の熱容量を考慮してセンサー温度を推定した。煙層内の天井流温度について、渡邊ら¹⁾は Alpert の天井流温度の実験式を拡張し、温度が T_s [K]、下端高さが z [m]の煙層内での天井流の温度 T_g [K]の予測式

$$T_g - T_a = \left\{ 1 - \left(\frac{z}{H} \right)^{5/3} \right\} (T_s - T_a) + \Delta T_A(H, r) \quad (1)$$

を提案している。ここで、 $\Delta T_A(H, r)$ は Alpert²⁾により提案されている火源の発熱速度 Q [kW]、天井面から火源面までの高さ H [m]、火源中心軸からの距離 r [m]が与えられたときの煙層が形成されない無限天井下の天井流の温度上昇 [K]であり、次式で記述される。

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

また、Alpert は天井流の流速についての実験式

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

も提案している。

この天井流温度 T_g に対して、応答速度を考慮してセンサー温度 T_d [K]を推定するためにスプリングラヘッド等の温度応答予測に広く用いられている Heskestad ら³⁾の RTI-C'モデル

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_g - T_d) - C'(T_d - T_b) \quad (4)$$

に適用する。ここで、 T_b はセンサー基部の温度[K]であるが、本報では空気温度 T_a [K]に等しいものとして扱う。また、RTI はセンサー固有の応答の速さを表す指標[(ms)^{1/2}]、C'はセンサー感熱部から基部への熱損失にかかる係数[s⁻¹]であり、これらは既報⁴⁾に示すとおり、RTI=70、C'=0.0003 とした。

渡邊らは煙層内の天井流の流速 u についての実験式を提案していないが、上記の実験における風速の測定値と式(3)のアルパート式による予測値を比較すると、図5に示すように良い一致を示しており、煙層内の天井流流速はアルパート式で予測できるものとする。

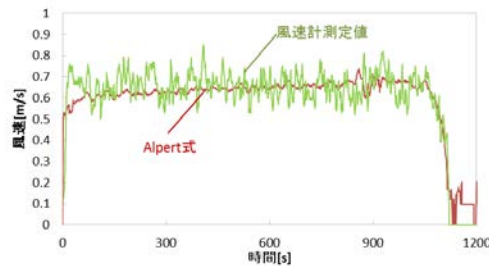


図5 天井流流速の予測（定常火源・実験5）

図2、図3に示す実験における測定点b及びeでの天井流温度及びセンサー温度の推定値と実験値を比較したものがそれぞれ図6、7である。

いずれも温度上昇過程では推定値と実験値はよく一致しており、上記の手法で火災初期のセンサー温度の推定ができることが示された。一方で、定常火源では約1200秒以降、成長火源では約500秒以降の温度減衰過程において測定値に比べて推定値の温度低下が速い。これは、熱電対で測定した天井流の温度変化に顕著に見られ、天井表面温度が上昇していたと推測される。従って、一般の居室等の天井ではあまり見られないが、熱容量が小さく、火災初期の小さな火源でも表面温度が急激に上昇するような天井では、本報で示す推定法では、センサー温度を過小評価してしまい、火災感知が遅れる恐れがあることに注意する必要がある。

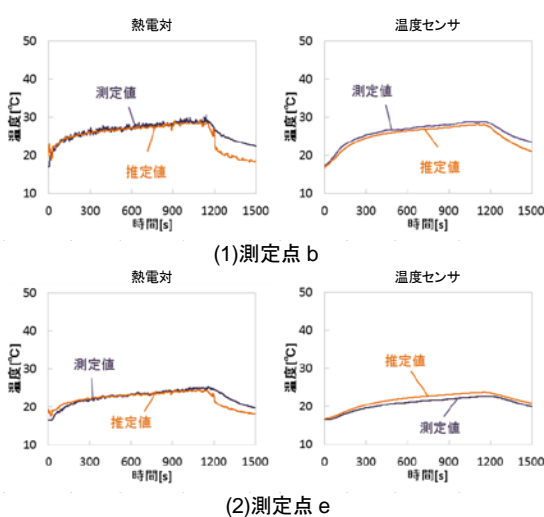


図6 天井流・センサーの温度推定（定常火源：実験2）

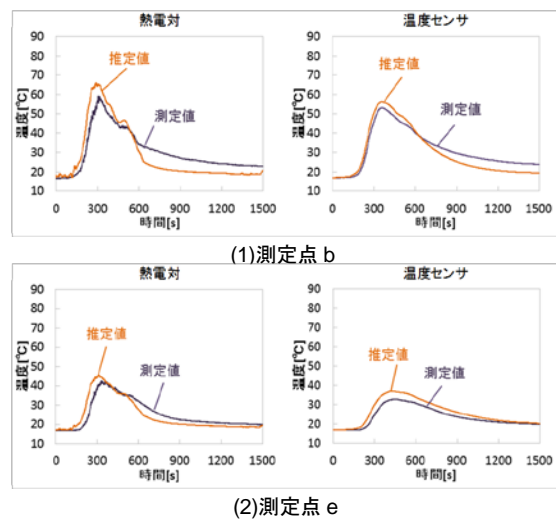


図7 天井流・センサーの温度推定（成長火源：実験7）

【結論】

本研究では、火災初期の天井流の性状とセンサー温度の応答性状を把握するための実大規模実験を実施することにより、火源から近い範囲では、天井面付近の温度を測定することで、比較的応答の遅い汎用温度センサーでも火災感知が可能であることを示した。しか

しながら、火源から離れると天井流の影響は小さくなりセンサーの応答は遅くなること、火災初期の小さな火源では空調吹き出し口に近い所までは天井流が到達できないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 渡邊純一他, 二層ゾーンモデルと Alpert の式の併用による天井流温度予測～ISO 試験火災による比較検証～, 平成 12 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.60-63, 2000
- 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 Smith, H. F., Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test: The Plunge Test, Factory Mutual Research, FMRC Serial No.22485 RC 76-T-50, 1976
- 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）

汎用温度センサーによる火災感知可能範囲を、火源規模、空間寸法及び空調気流等の日常気流性状に応じて決定する方法を導くためには、センサーの温度変化から火源の発熱速度を精度良く推定することが必要である。そのため、下記内容の実験が望まれる。

- 1) 室内における火源の高さと位置を変えることで、火災の成長と個々の温度センサーが感知可能な範囲との関係を把握する。また、2つ以上の温度センサーの測定値から、火源位置と火源強度の同時推定を試みる。
- 2) 空調からの吹き出し気流を実験区画内で再現し、火災前から生じている初期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。平成 28 年度の実験では、空調気流による天井流の押し返しが起こることを定性的に再現したが、空調気流と天井流の強さの比により押し返し位置を予測する理論を考案し検証するための実験を行う。
- 3) 実在可燃物に近いものとして、ウレタンフォーム（クッション）、紙くず（ゴミ箱）等の燃焼実験も併せて行い、火源の成長速度により火源の推定精度がどのように影響されるかを把握する。

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、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その 1）実規模区画実験とセンサー温度の推定、平成

- 29年度日本火災学会研究発表会概要集、2017.5（掲載予定）
- 2) 難波真衣、仁井大策、原田和典、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その2）空調気流の影響、平成29年度日本火災学会研究発表会概要集、2017.5（掲載予定）
 - 3) 仁井大策、難波真衣、原田和典、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その1）実規模区画実験とセンサー温度の推定、平成29年度日本建築学会近畿支部研究発表会梗概集、2017.6（掲載予定）
 - 4) 難波真衣、仁井大策、原田和典、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その2）空調気流の影響、平成29年度日本建築学会近畿支部研究発表会梗概集、2017.6（掲載予定）
 - 5) 仁井大策、難波真衣、原田和典、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その1）実規模区画実験の概要、平成29年度日本建築学会大会学術講演会梗概集、2017.8（掲載予定）
 - 6) 難波真衣、仁井大策、原田和典、田中哮義、松山賢、沖永誠治：室空間の使用実態に応じた火災感知方法の提案（その2）空調気流の影響、平成29年度日本建築学会大会学術講演会梗概集、2017.8（掲載予定）

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)	54,281	旅費	118,060	該当なし	0
漏煙試験用発煙片 (1箱)	58,320	宿泊費	25,500		
デジタルカメラ、ビデオカメラ一式	113,712				
温湿度ロガー/センサー一式	123,120				
小計	349,433	小計	146,100	小計	0
東京理科大学 負担分 総計 492,993 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	26,200	旅費	35,100	該当なし	0
ウレタンマットなど	6,129				
小計	32,329	小計	35,100	小計	0
京都大学 負担分 総計 67,429 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)