

空間の使用実態に基づいた火災感知方法の提案

Suggestion of the fire perception method based on the daily usage of the room

建築学専攻 原田・上谷研究室 牧川真央

1. 序論

1.1. 研究の背景

平成 28 年版消防白書[1]によれば、平成 27 年に火災により死亡に至った経過の 49.1%が逃げ遅れによるものであることや、64.7%が高齢者の死者数であるといった現状もあり、安全な避難が実行できる事の重要性が確認される。火災時に火災の発生をいち早く在室者が知ることが出来れば、初期消火や消防への通報による被害拡大の防止、素早く避難開始や介助行動を行えることによる避難安全性の向上など、様々な効果が期待できる。そのため、火災の被害を低減するうえで火災感知は非常に重要な位置を占めている。一方で近年では、日常の温度範囲で使用する汎用の温度センサが安価で普及してきている。これを用いて、室内の温度を常時モニタリングすることで日常の使用実態によって生じる温度変動のパターンを把握し、日常からの逸脱を異常として検知できれば、誤報の可能性が少なく素早い火災感知が可能になると考えられる。火災感知の速度が向上すれば、初期消火が容易になるとともに、避難・介助に時間的余裕が生じる等、様々な火災による被害の軽減への効果が期待される。

1.2. 研究の目的

本研究では、室内にある可燃物や日常的生活行動といった室空間の使用実態をもとに、汎用温度センサによって測定された温度変化の時刻履歴から、日常的な使用状態で生じる温度変化を非火災、それ以外の温度変化を異常として確実に判断できる方法の提案を目的とする。

2. 空間の使用実態の調査

2.1. 調査の目的

火災が発生した場合に温度変化から正確に異常を検知するための判定条件が必要とする条件は以下の 2 つである。

A: 日常的な使用によって発生しうる温度変化を非火災として看過出来る

B: 室内の可燃物が火源となり火災が発生した場合には、温度変化から異常を感知できる

本研究では、日常生活を行っている室内でどのような温度変動が起きているのか、火災時にはどのような温度変化が予想されるのかという知見を得る事を目的とし、京都市内にある個室ユニット型介護老人福祉施設を対象として調査を行った。

2.2. 日常温度変動の測定

対象施設の個室 1 室及び共同生活室の日常的な温度変動を 2016 年の 1/9 から 8/5 の期間継続的に測定した。温湿度センサ (HIOKI 社, 温湿度ロガー LR5001) を用いた。温湿度センサを設置したのは個室内の化粧台上部、共同生活室の室中央付近天井・キッチン付近天井・冷蔵庫上部の計 4 か所である。

2.3. 温度変動の測定結果

温湿度センサによる測定の結果について、個室および共同生活室中央の 2 か所での夏季・冬季の測定結果の例を図 1, 2 に示し、それぞれの特徴的な傾向を述べる。キッチンおよび冷蔵庫上部での測定結果は共同生活室中央でのものと同様の傾向であった。

夏季 (2016/07/24)

- ・個室 空調によって温度が保たれており、一日を通してほとんど温度の変化はなかった。
- ・共同生活室中央 空調の影響が強く、日常的生活行動によって 2℃ほど上下するが、おおむね一定の温度に保たれていた。

冬季 (2016/02/02)

- ・個室 同様に空調によって温度が管理されており、利用状況によって小さく変動がみられるが最大で 2℃程度であり、終日ほぼ一定の温度で保たれていた。
- ・共同生活室中央 空調稼働時は温度が 25℃前後で一定に保たれ、利用状況により 3~4℃程度の温度変化が見られる。しかし、空調を OFF にして夜間に温度が低下し、翌朝空調を ON にしたと考えられる時間帯に急激な温度の上昇がみられた。このときの温度上昇量は 30

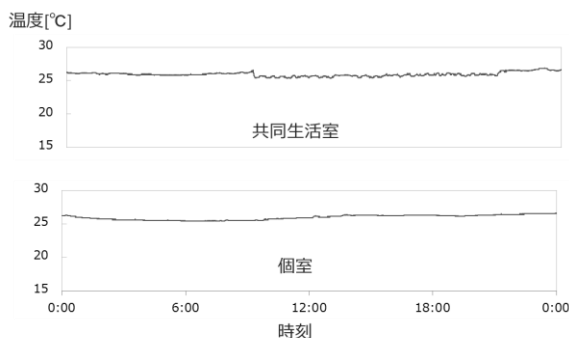


図1 夏季の温度変動パターン

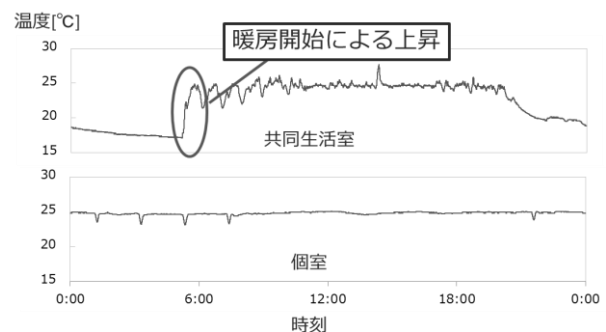


図2 冬季の温度変動パターン

分間で最大 7.5℃程度であり、測定期間全体を通して最も大きい温度の上昇であった。

2.4.特徴的な温度変化の抽出

測定された温度変化は実際に日常的に生じているものであり、火災時に予想される温度変化と明確に区別できる必要がある。そこで、測定された温度変化の中でも、最も大きい温度変化をすると考えられる、冬季の共同生活室で前日夜にエアコンを切り、翌日朝に暖房運転を始めたと考えられる場合の急激な温度変化について検討する。2016/01/10~2016/04/30 の期間において上記の条件を満たしており、その上昇温度が比較的大きいと考えられる 21 データについて、それぞれ温度上昇開始から 30 分間の温度変化を図 3 に示す。エアコンのような一定温度の気流によって暖められる物体の温度応答は一般的に指数的な変化をすると考えられることから、各測定値を包絡するような曲線を以下の式(1)で表すものとした。

$$\Delta T = 7.5(1 - e^{-t/400}) \quad (1)$$

ここで、 ΔT [℃]は初期状態からの温度上昇量、 t [s]は温度上昇開始からの経過時間である。

2.5.対象室の物品調査

室内に設置してある可燃物が火源となり火災が発生した場合には、その兆候を確実に検出する必要がある。そのためには、室内にある物品がどの程度の大きさの火源となり得るかを事前に検討しておく必要がある。そこで、共同生活室内の家具や物品等を調査し、材質やおよその寸法・重量から、火源となった時の火災成長率・最大発熱速度を推定した。

2.6.火災判定条件の設定

特に共同生活室について、日常的な温度変動として看過すべき変動パターンのうち、最も大きいのは式(1)で表されるような冬季早朝時の空調による温度上昇であると考えられる。それを踏まえた上で、共同生活室内での火災を判断する基準を以下に従って検討する。

定常温度が ΔT_{∞} [℃]となるような定常火源に対する温度センサの温度 ΔT_d の時間変化は、以下の式(2)に示すような指数的な変化をすると考えられる。ここで、 t_0 は時定数である。

$$\Delta T_d = \Delta T_{\infty}(1 - e^{-t/t_0}) \quad (2)$$

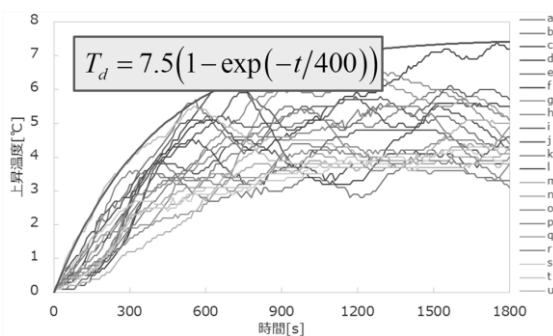


図3 急激な温度変動

式(2)での定常状態での温度上昇量を式(1)の係数である 7.5 から安全側に見て 8℃とする。室内の可燃物から共同生活室中央に設置した温湿度センサまでの距離の平均値である水平距離 3.7m・高さ 1.5m の位置で火源が生じ、温度が 8℃に漸近するような発熱速度の大きさはおよそ 13.2kW と推定される。そこで、この位置で 13.2kW の定常火源が発生した場合に生じる式(7)の変化を、この室における火災感知判定条件として定めるものとし、温度センサによる測定値が温度上昇を開始してから、この判定条件を上回った時点で火災と判断する。その時の式は以下の式(3)ようになる。

$$T_d = 8(1 - e^{-t/153}) \quad (3)$$

このとき、定常温度に漸近する速さは時定数によって決定される。式(8)における時定数は 153 であり、これは式(1)の時定数である 400 と比較して十分に小さく、温度が定常温度に漸近するスピードが十分に速いことを示している。

式(1)と式(3)の比較したものを図 4 に示す。判定条件となる式(3)は、日常的な変動である式(1)よりも十分に大きく、この条件十分によって日常条件で発生しうる温度変化をすべて非火災と判断することが出来ると考えられる。

3.実規模区画での燃焼実験

3.1.実験概要

日常的に測定した温度変動データおよび調査した室内の可燃物情報から決定した火災感知判定条件を元に、同程度の温度変化の再現を目的として実規模区画での燃焼実験を実施した。所定の位置での温度センサの測定値が基準と同じ 8℃となるような発熱速度の火源を区画内にて燃焼させ、区画内の温度の変動を測定した。また、室内に設置した空調による吹出し気流が火災時の天井付近の気流性状に与える影響の検証を目的とし、火源の燃焼に加えて空調作動時の気流を模型によって再現した状況での測定も同時に行った。

実験を行った区画は幅・奥行ともに 6500mm、天井高さ 2700mm であり、壁の 1 つに幅 2900mm・高さ 2100mm の開口を有する。実験区画の平面図及び断面図を図 5 に示す。火源を図中 A または B のいずれか(図中□印)に設置し燃焼させた。火源燃焼開始から 20 分間の天井流の温度を図中 a~g の 7 か所(図中○印)の天井下 10mm および 30mm の 2 点に設置した ϕ 0.1mm の T 型熱電対で測定した。また、測定点 h では実験区

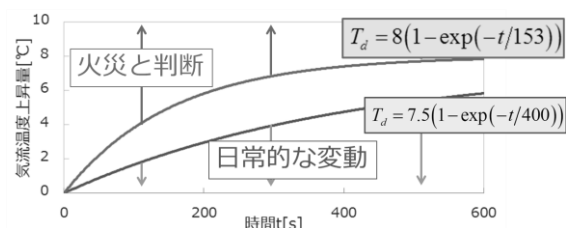


図4 火災感知判定条件の設定

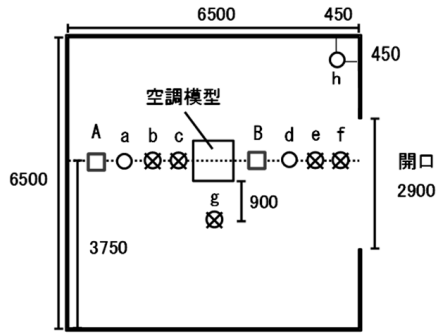


図5 実験区画図面 (単位: mm)

画内の温度の垂直分布を測定するため同じく T 型熱電対を設置した。さらに、図中 b, c, e, f, g の 5 か所 (図中 × 印) の天井下に 2 章で用いた物と同様の温湿度センサを設置し、温度の測定を行った。

また、空調作動時の気流が火源からの天井流に及ぼす影響を検討することを目的とし、区画中央に天井埋め込み型のファンコイルユニットを模擬した模型 (以下、空調模型) を設置した。模型の概要図を図 6 に示す。空調模型は、910×910mm の 2 枚の平板を 45mm 間隔で張り合わせて各辺に 45×820mm の吹出し口を有しており、内部にはガイドやルーバーを設けて吹出し口からの気流分布をおおむね一様とした。空調模型下

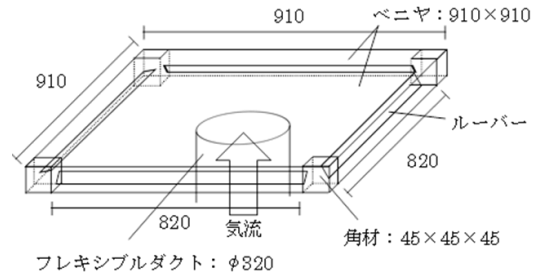


図6 空調模型概要 (単位: mm)

表1 実験条件

実験No.	設定火源	発熱速度 [kW]	火源高さ [cm]	火源位置	吹出風速 [m/s]
1	エタノール 360mL (火源径15cm)	5~8 (定常火源)	72	A	—
2			A	—	
3			A	3.0	
4			A	7.8	
5			B	3.0	
6			B	0.0	
7	クッション (33cm×33cm× 17cm)	~80 (成長火源)	33	A	—

面からフレキシブルダクトを通じて軸流ファンに送風することで、四方へ流れる吹出し気流を生成した。燃焼開始から 900s 後および燃焼終了後に火源近傍で発煙片に点火し、天井付近での気流の流れをデジタルビデオによって記録した。

火源の高さや位置、吹出し気流の強さを条件とし、計 7 回の実験を行った。各実験での実験条件を表 1 に示す。また、初期温度は天井に設置した a~g 点の熱電対の実験開始時の温度の平均値とした。実験 0~6 では、直径 15cm の火皿にエタノールを注入し、定常火源として燃焼させた。実験 7 については、40cm*40cm*5cm のクッション 3 枚を重ねて火源とし、実際の可燃物の状態に近い成長火源の一例として燃焼させた。

3.2. 実験結果

実験 1, 7 のそれぞれについて、発熱速度および熱電対・温湿度センサ (b 点) での測定値を図 7, 8 に示す。実験 1 では b 点での熱電対温度が Alpert 式で 8°C になるように設定したが実際には煙層の影響を受け、13°C 程度上昇した。また、どちらの実験でも d~g 点での測定値は部屋隅の h 点での測定値と同程度であり、一定距離以上では天井流の影響は小さかった。

3.3 吹出し気流の強さによる比較

吹出し気流の強さによる影響

実験 2, 3, 4 の測定結果から、空調模型による吹き出しの強さが天井付近の温度変化に与える影響を検討する。それぞれ a, b, c 点での熱電対の上昇温度を比較したグラフを図 9 に示す。これらの結果から、空調模型による吹出し気流と天井流が天井下で衝突した場合、混ざり合って一つの気流になるのではなく、衝突面を境にその前後で気流の性質が大きく異なる状態が生じ、その衝突位置は吹出し気流の強さと火源の天井流の強さとの兼ね合いによって変化すると考えられる。

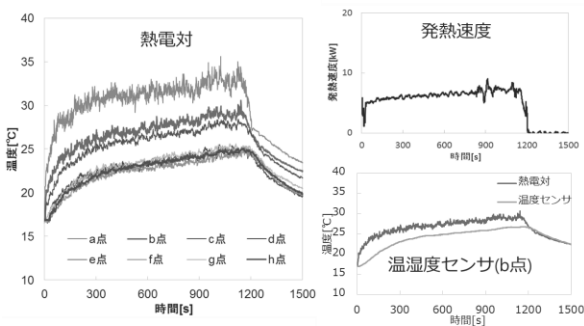


図7 実験1結果

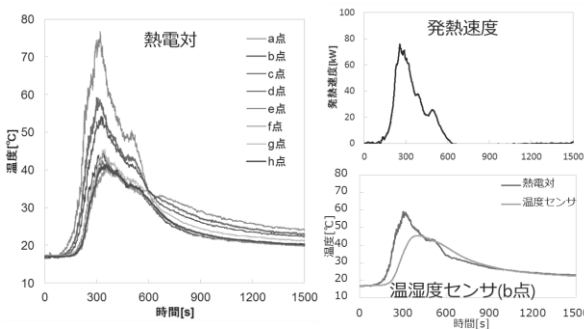


図8 実験7結果

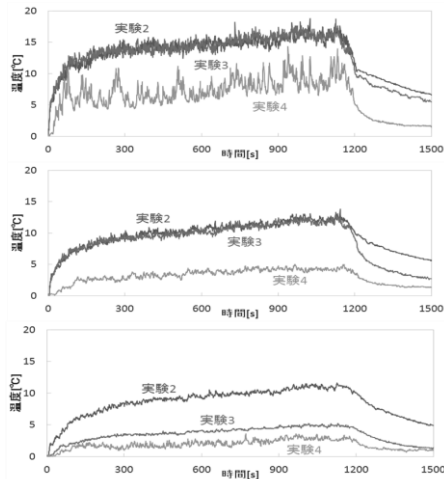


図9 吹出し気流の強さ比較

4. 使用実態に応じた火災感知法の検討

4.1. 温度変化の推定

区画内で火災が発生した場合、区画内に形成された煙層の影響で天井流の温度は端部開放時よりも高くなる。そのため区画内での天井流温度の予測には、煙層の影響を考慮することが必要となる。

区画内での温度センサの温度を応答は以下の Alpert 式(4)、渡邊モデル(5)および RTI-C'モデル(6)によって推定する。

$$\Delta T_g = 5.38Q^{2/3}r^{-2/3}H^{-1} \quad (4)$$

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

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_g - T_d) - C'(T_d - T_b) \quad (6)$$

ここで、 z は煙層下端高さ[m]、 T_s, T_a はそれぞれ煙層・下部層の温度である。

この方法で天井流温度の推定値を 3 章で行った実験の測定値と比較した結果、おおむね一致した。

4.2. 実空間での推定

介護老人福祉施設の共同生活室について、調査した可燃物の火災成長率および最大発熱速度を元に、それが火源となる火災が発生した場合の室内に設置した温湿度センサの温度変化を前節で述べた方法により推定し、2.5 節で決定した火災感知基準と比較することで、火災感知に必要な時間を計算した。また、一般的に用いられている定温式熱感知器の一例として、公称作動温度 $60^\circ\text{C} \cdot \text{RTI}=15 \cdot \text{C}'=0$ である感知器を想定して温度応答を計算し、作動するまでに必要な時間も同様に計算した。それぞれの温度応答予測と火災感知基準の比較を図 10 に示す。2.5 節で設定した火災感知基準を用いれば、定温式熱感知器よりも 52s 早く感知することが可能であるという結果であった。

4.4. 空調の影響

室内で空調が稼働している場合、吹出し気流によっ

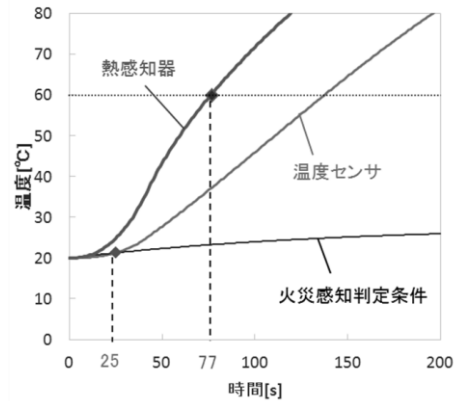


図10 感知時間比較

て天井付近の気流性状が変化し、天井流が温度センサまで届かず異常を感知できない可能性が高い。共同生活室内にも中央付近に 2 つの FCU が設置されており、実際には中央に設置した温湿度センサだけでは異常を感知できない物品があると考えられる。

室中央にある FCU による影響の推定範囲を考慮すれば、温度センサの設置位置を改善する方法は幾通りも考えうるが、大半の可燃物に関して片方への天井流が吹出し気流によって阻害されても他方で感知することが可能であるような少なくとも 2 か所以上に設置することが必要であると考えられる。しかし、FCU の真下で火源が発生した場合については、火源による気流が空調によってかき消されてしまい、温度センサの位置に関わらず感知を行うのが難しいと考えられる。

5.1. 結論

空間の使用状況をもとに火災判定条件を設定し、温度センサを用いて室内の温度変動履歴から火災の感知を行う方法を提案した。渡邊モデルおよび RTI-C'モデルを用いた推定の結果、既存の定温式熱感知器を用いるよりも早く感知が可能であることを示した。ただし、室内空調の吹出し気流が火災時の気流性状に影響を与えることから、火災感知を予測する上で検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の実態調査では建物を管理運営している方々のご協力をいただいた。また、燃焼実験は平成 28 年度東京理科大学共同利用・共同研究により行われた。

参考文献

- [1]平成 28 年度版 消防白書, 消防庁
- [2]渡邊純一ら, 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.
- [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