

放射温度計の活用方策に関する検証

眞田 良仁*, 飯田 明彦*, 田幡 祐基*, 木田 哲夫*

湯浅 弘章*, 細谷 昌右*

概要

本検証では、放射温度計の基礎的な機能の確認を行った上で、実大規模の火災で生じる熱気を含んだ濃煙等に対して放射温度計等を使用した場合の表示温度の傾向を明確にし、火災現場での延焼拡大による活動危険を事前に把握する方法の有無と有効な活用方策を明示することを目的とし実験を行った。

その結果、放射温度計及び簡易型熱画像直視装置は、使用に際する注意点はあるが、燃焼拡大の危険性及び建材裏側の高温状態を推測するために温度を把握する資器材として活用できることが分かった。特に簡易型熱画像直視装置は熱画像の確認により、放射温度計では困難なより離れた位置からの熱源の把握や煙発生時の温度環境の把握が比較的容易にできるものであることが分かった。

1 はじめに

赤外線測定による放射温度計及び熱画像直視装置は、非接触で離れた位置から瞬時に物体表面の温度測定ができるといった特徴があり、火災現場における延焼拡大等の活動危険を事前に把握する資器材として活用できる可能性がある。しかし、火災性状や火災の進展に伴う温度変化を放射温度計等で測定したデータの蓄積がなく、延焼拡大危険の可能性を把握する指標が正確に測定できるのか、明確に示せない状況である。

2 目的

本検証では、放射温度計の基礎的な機能の確認を行った上で、実大規模の火災で生じる熱気を含んだ濃煙等に対して放射温度計等を使用した場合の表示温度の傾向を明確にし、火災現場で延焼拡大による活動危険を事前に把握する方法の有無と有効な活用方策を明示することを目的とする。

3 機能確認実験

(1) 熱源距離変化検証

ア 測定装置等

ア 放射温度計

使用した放射温度計の仕様は表1のとおり

(イ) 熱画像直視装置（以下「熱画像カメラ」という。）

型式:R500EX-Pro、測定波長:測定温度範囲:0~2,000℃、測定距離範囲:10cm~∞

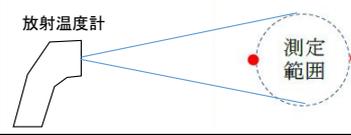
(ウ) 温度測定対象物

20cm×20cmのシリコンラバーヒーター（以下「ヒーター」という。）に黒体塗料（放射率 0.94）を塗布し、約180℃（±10℃）に加熱した。

イ 実験方法

図1のように装置等を配置し、測定距離D（0.8~4.8m）における放射温度計の表示温度について検証した。なお、測定距離Dは0.2m毎に測定した。

表1 放射温度計の緒元性能

規格	レーザーポインター2点型 防塵・防水（※保護等級IP54） 
測定距離:測定範囲直径	12:1
測定温度範囲(精度)	0~550℃: ±2%または±2℃(数値の大きい方) -60~0℃: ±{-2+(表示温度×0.05)}℃
最小表示(分解能)	-9.9~199.9℃:0.1℃ それ以外は1℃
測定間隔	1秒
使用温度	0~50℃
放射率	0.1から1まで調整可能 ※本検証では0.95に設定
形状寸法	144×43×117mm
質量	180g(単4電池×2本含む)
連続使用時間	14時間

※防塵:若干の粉塵の侵入があっても正常な運転を阻害しない。
※防水:いかなる方向からの水の飛沫によっても有害な影響を受けない。

* 装備安全課

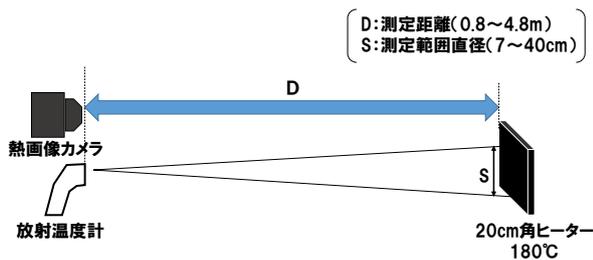


図1 熱源距離変化検証イメージ

ウ 結果及び考察

測定距離が離れるにつれて放射温度計の温度表示が下がっていることが分かる(図2)。測定距離Dが0.8~2.4mの範囲では、測定範囲が温度測定対象物(ヒーター)より広がっている状態(以下「視野欠け」という。)が生じていないが、温度が低下している。これはヒーターの中央部がより温度が高くなっているため(図3)、その影響から温度が低下したものと考えられる。測定範囲Dが2.4~4.8mの範囲では、視野欠けが生じているため温度表示の低下がより顕著になっているものと考えられる。

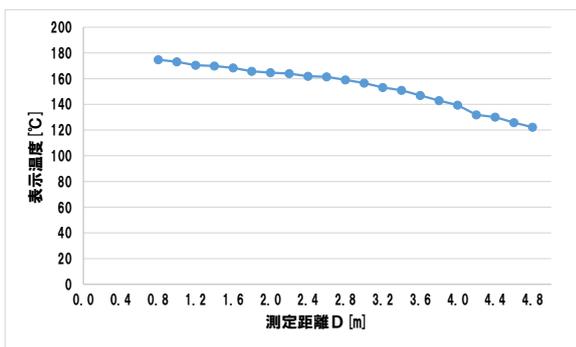


図2 熱源距離による表示温度の変化

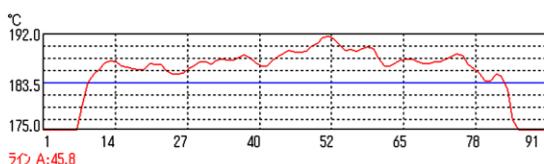
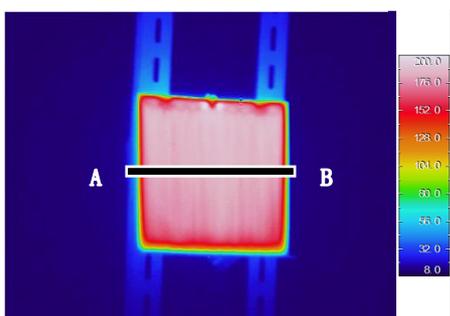


図3 熱画像カメラによるラインプロフィール

(2) 測定範囲内での熱源移動検証

ア 測定装置等

(ア) 放射温度計等

前(1)と同じ放射温度計及び熱画像カメラを使用した。

(イ) 温度測定対象物

電熱により加熱部分(直径1.5cm)が最高380°Cまで加熱される熱源を用いた(図4)。黒体塗料を加熱部分に塗布した。

イ 実験方法

図5のように装置等を測定距離が2.4mとなるよう配置し、温度測定した。熱源は測定範囲の中心点から外周部に2cmごとに移動させた。

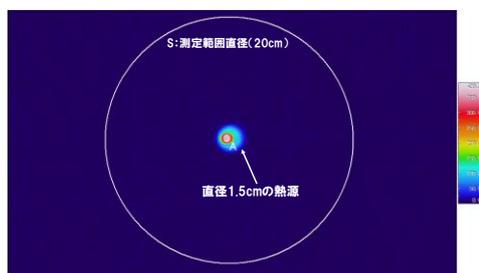


図4 熱画像カメラ(直径1.5cmの熱源)

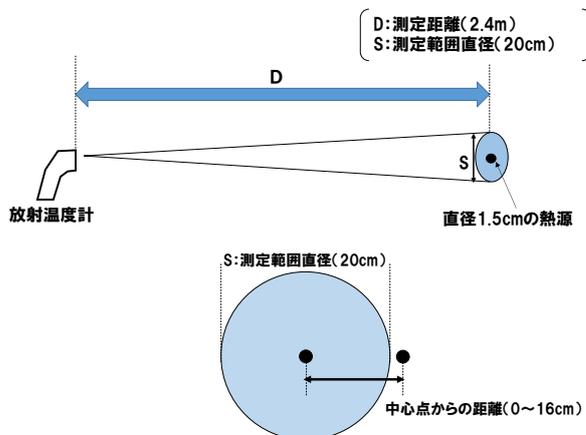


図5 測定範囲内での熱源移動検証イメージ

ウ 結果及び考察

図6から熱源が中心点から移動する毎に表示温度が下がっていることが分かる。熱源が測定範囲の中心点からの距離10cmに至る前から表示温度が低下しており、10cmのときには周囲温度(7.0°C)からごくわずかに高い7.4°Cを表示した。測定範囲の中心部分がより赤外線を感じやすい特性をもっている一方、測定範囲の外周部はほとんど赤外線を感じていないと考えられる。測定の感度が良い部分は測定範囲の直径の半分程度であると考えられる。

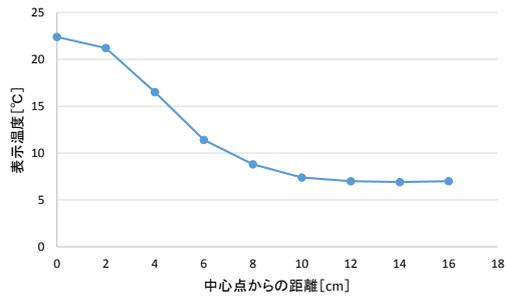


図6 測定範囲の中心点からの移動に伴う表示温度変化

(3) 湯気または黒煙が温度表示に及ぼす影響の検証
ア 測定装置等

ア 放射温度計等

前(1)と同じ放射温度計及び熱画像カメラを用いた。

イ 温度測定対象物

前(1)と同じヒーターを用いた。

ウ 測定の干渉要因となる湯気または黒煙

ウ a 湯気

約 250°Cまで熱した鉄板の上に霧吹きで水を噴射し、発生させた。

ウ b 黒煙

ポリスチレン及びポリウレタンをそれぞれ 2,000cm³ ずつ燃焼させ黒煙 (約 120°C) を発生させた。

エ 実験方法

図7のように装置等を配置し、温度を測定した。

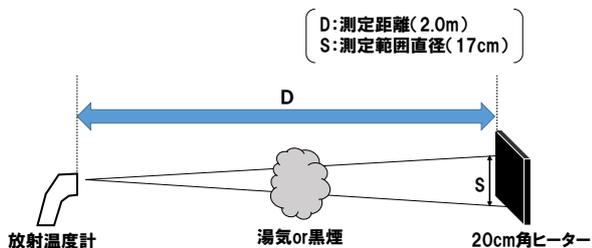


図7 湯気または黒煙が温度表示に及ぼす影響の検証イメージ

ウ 結果及び考察

図8は測定干渉がない状態の表示温度 170°C (以下「初期表示温度」という。) から最も表示温度が変化した瞬間の測定干渉の状況である。表示温度はそれぞれ湯気が 141.3°Cであり、黒煙が 152.4°Cであった。

ア 湯気

黒煙の場合と比較して視界が良いが、黒煙よりも測定干渉の影響が大きく、低い表示温度となった。これは湯気の微細な水滴が赤外線乱反射を生じさせたこと及び水滴自体の温度 (100°C以下) が影響していると考えられる。湯気が発生している場合は見た目の湯気発生量以上

に測定干渉となり、高温部が奥にある場合でも温度が低く表示されるおそれがある。

イ) 黒煙

黒煙の主成分である炭素自体の温度が初期表示温度からの変化に影響を及ぼしていると考えられる。炭素は湯気の水滴ほどは乱反射せず、100°C以上の高温にもなるため、初期表示温度より低くはあったが湯気より表示温度が高くなったと考えられる。本実験では黒煙の温度がヒーター温度より低い 120°C程度であったため表示温度が下がったが、より高温の黒煙が発生すれば放射温度計の表示が測定温度対象物よりも高くなることも考えられる。また、黒煙の層が厚ければ、より黒煙自体の温度に依存する温度表示になると考えられる。

ウ) 熱画像

熱画像カメラにより黒煙が発生した状況を撮影したところ (図9)、肉眼 (可視光) では捉えられない黒煙の奥のヒーターが鮮明に確認できる。黒煙を通過することにより表示温度は 20°C程度下がるものの、熱源の確認は容易にできる。また、黒煙とその先にあるヒーターのどちらの温度を顕著に測定しているかの判別ができる。

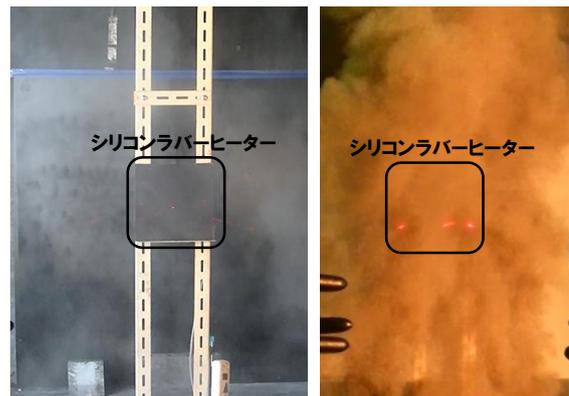


図8 測定干渉を発生させた状況 (左図: 湯気、右図: 黒煙)

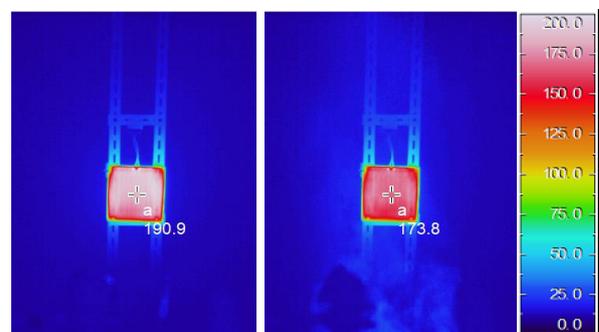


図9 測定干渉を発生させた状況 (左図: 黒煙発生前、右図: 黒煙発生中)

4 実大燃焼実験

(1) 実験方法

燃焼室で火源（ヘプタン）を燃焼させ、初期から盛期に至るまでの火災を再現し、燃焼室各部分の温度を熱電対、放射温度計及び熱画像カメラで測定する。床面には合板を配置し、燃焼室上方からの放射熱により熱せられて発火する様子の観察を行った。また、燃焼室の壁材を替えた場合の外側の温度変化も比較する。

ア 測定装置等

ア) 放射温度計

前3に同じ放射温度計を使用した。

イ) 簡易型熱画像直視装置

表2に示す簡易型熱画像直視装置（以下「簡易熱画像装置」という。）を使用した。

ウ) 熱電対

素線径 0.32 mm の K 型熱電対を使用した。

表2 簡易熱画像装置

【仕様】	
	型式：FLIR K1
	検出器：2次元非冷却センサ
	測定波長：8～13μm
	測定温度範囲：-10～400℃
	防塵・防水性能：IP67
	耐落下性能：2m
	※防塵：完全な防塵、防水：30cm～1mの水深に30分間水没しても異常がない

イ 実験条件

ア) 燃焼室

幅 3,300mm × 奥行 3,600mm × 高さ 2,100mm の出火室とし、正面に開口部（高さ 1,800mm × 幅 900mm）を設定した。

イ) 火源

オイルパン（60cm 角）× 2 個に 6 L ずつヘプタンを入れて同時に燃焼させた。

ウ) 合板

90cm × 90cm の合板（10mm 厚）を床面に配置した（以下「床面合板」という。）。

エ) 温度測定箇所

熱電対（K型）は7箇所（a～f）、放射温度計は5箇所（A、B、D、E、F）で測定した。簡易熱画像装置は、放射温度計の測定範囲全体が含まれるように測定した。放射温度計、熱画像カメラ及び簡易熱画像装置は燃焼室から 3,000mm、高さ約 1m の位置で測定した（図 10）。なお、放射温度計の測定範囲直径は A、E、F が約 25cm、B が約 55cm、D が約 40cm となる。

オ) 壁材

燃焼室の外側の温度を計測する壁材は以下の5種類とし、それぞれ1回ずつの燃焼実験（計5回）を行った。

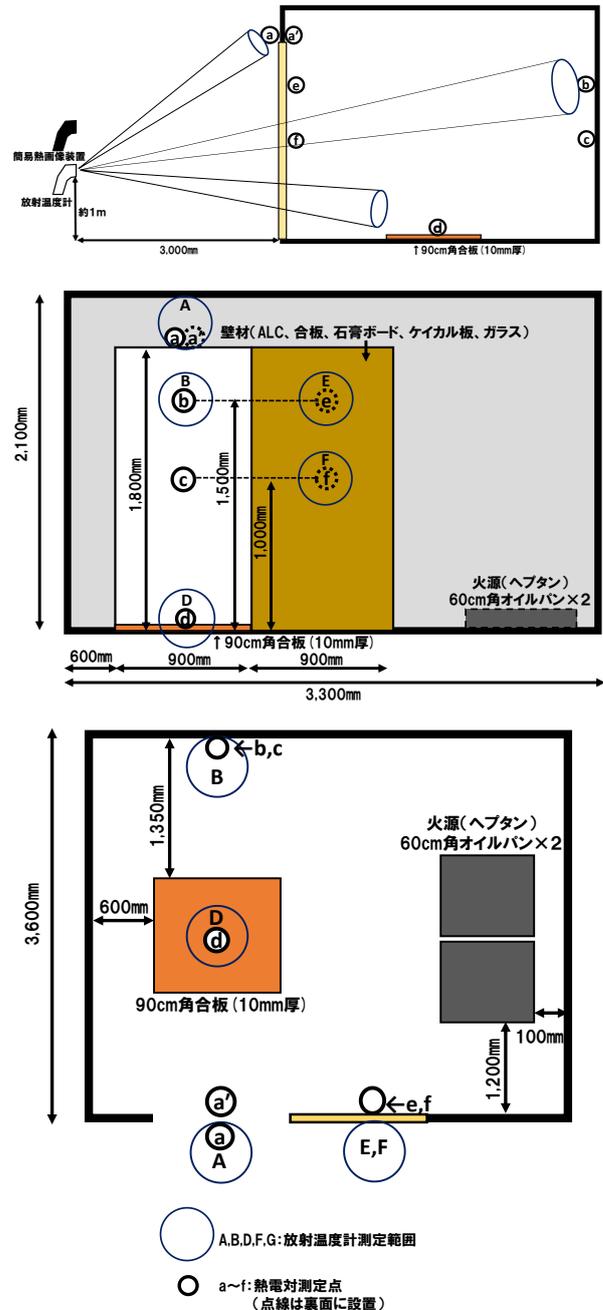
実験①：ALC（37.5mm 厚）

実験②：合板（10mm 厚）※スギ材

実験③：石膏ボード（12.5mm 厚）

実験④：けい酸カルシウム板（10mm 厚）（以下「ケイカル板」という。）

実験⑤：ガラス（ファイアライト 8mm 厚）※特定防火設備に用いられるガラス



(2) 結果及び考察

ア 燃焼実験の状況

ア) 燃焼拡大について

実験① (ALC) では点火から2分59秒後、実験⑤ (ガラス) では点火から3分10秒後に床面合板が発火する燃焼拡大が生じた。その他の実験パターンでは床面合板の燃焼拡大は生じなかった。実験① (ALC) の状況を観察すると、表3及び図11のような変化が見られる。

表3 実大燃焼実験の燃焼状況 (実験①)

点火からの経過時間	燃焼状況
1分後	燃焼室内で中性帯(高さ約1m)が観察できる。
2分後	床面合板に熱分解の煙が生じ始める。 床面合板表面にやや黒色の変色も確認できる。
2分30秒後	熱分解が激しく生じている。熱分解の煙が床面合板表面を覆うように発生している様子が確認できる。
3分後	床面合板が発火した。 床面合板表面が激しく燃焼し炎に覆われている。



図11 実験①の燃焼状況

全ての実験パターンで2分30秒後までの状況が観察されたが、床面合板の発火が生じたのは実験① (ALC) 及び実験⑤ (ガラス) のみであり、実験②～④では激しい熱分解は生じたものの発火には至らずにヘプタンの燃焼が終了した。しかし、実験後の床面合板の状況 (図12) を比較すると、発火した床面合板ほど深くまでは炭化していないが、発火していない床面合板も表面が炭化しており、熱分解が生じた痕跡が確認できる。したがって、床面合板が発火まで至らなくとも、可燃性ガスが生じ、燃焼室内で充満するという危険性はあると考えられる。

イ) 壁材の燃え抜けについて

壁材については実験② (合板) のみ防火上支障がある損傷が見られた。点火3分後に壁材の上部が激しく燃焼しながら燃え抜けた様子が確認できた (図13)。



図12 実験後の床面合板の状況
(左図：発火あり、右図：発火なし)



図13 実験②の壁材 (合板) 燃焼状況
(左図：点火3分後、右図：消火後)

イ 放射温度計と熱電対による温度表示の比較

実験①の測定箇所ごとの温度変化を図14～20に示す。

(ア) 開口部上 (熱電対 a 及び放射温度計測定箇所 A)

放射温度計の温度表示が熱電対で測定した温度よりも高く表示されていることが分かる。これは燃焼室内側の高温の黒煙 (a' に近い温度の黒煙) が開口部の上部を覆うことにより、放射温度計の表示温度が黒煙の温度に影響されたものと考えられる。

(イ) 正面 (熱電対 b 及び放射温度計測定箇所 B)

放射温度計の温度表示が熱電対で測定した温度よりも低く表示されている。放射温度計は高さ1.5mよりも低い部分の中性帯の温度 (熱電対 c の温度) に近い温度を表示している。中性帯が厚く覆われている部分の測定では室内の温度を正確に測定することは困難であると考えられる。

(ウ) 床面合板 (熱電対 d 及び放射温度計測定箇所 D)

放射温度計と熱電対が他の測定箇所と比較して同等の温度表示を示している。煙が少なく、測定干渉の影響が少ない床面合板の測定では放射温度計の温度が正確に表示されているものと考えられる。

(エ) 壁材裏面 (熱電対 e、f 及び放射温度計測定箇所 E、F)

熱電対は燃焼面側、放射温度計は燃焼面の反対側を測定しているため放射温度計の表示温度が大幅に低いが、燃焼室内で数百度に至る燃焼が生じている場合は、燃焼面裏側でも温度上昇が生じていることを捉えられることが分かる。

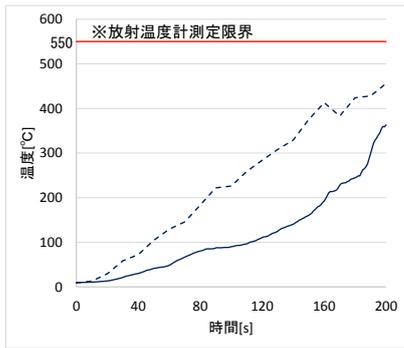


図 14 熱電対 a (実線) と放射温度計 A (点線)

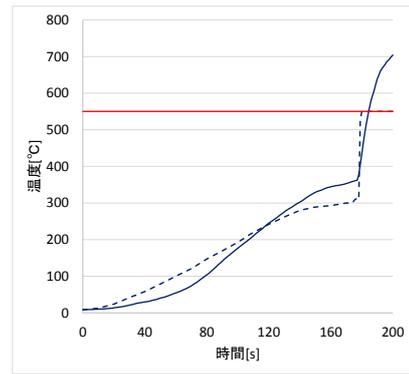


図 18 熱電対 d (実線) と放射温度計 D (点線)

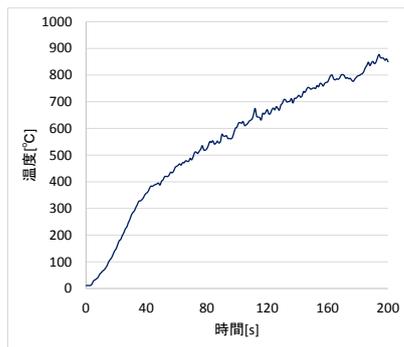


図 15 熱電対 a' の温度変化

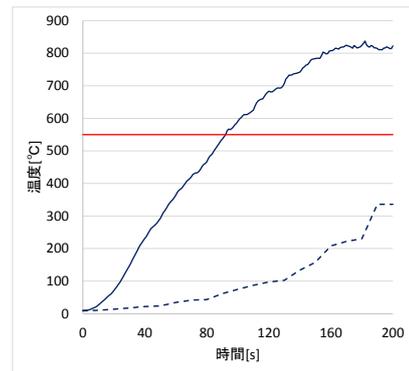


図 19 熱電対 e (実線) と放射温度計 E (点線)

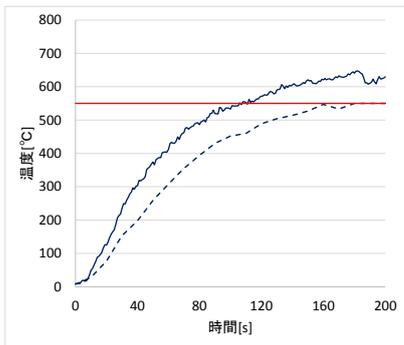


図 16 熱電対 b (実線) と放射温度計 B (点線)

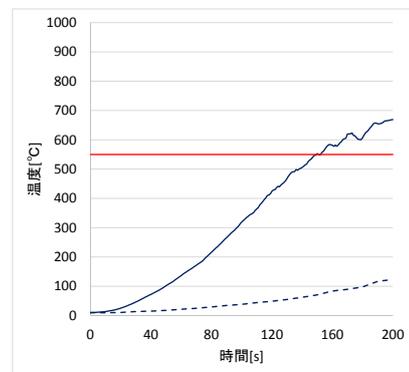


図 20 熱電対 f (実線) と放射温度計 F (点線)

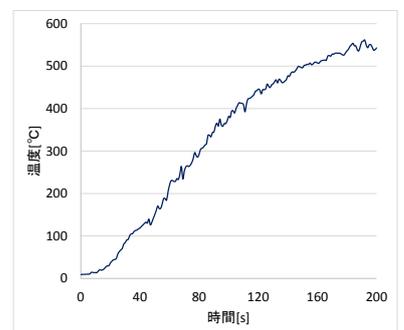


図 17 熱電対 c の温度変化

ウ 燃焼拡大の危険を示す放射温度計の数値

(ア) 放射温度計測定箇所 A、B (開口部上、正面)

放射温度計で中性帯や開口部から噴出される黒煙の温度を測定することにより火災室内が高温状態になっていることを推察することはできるが、空間の温度に関して比較的正確に測定できる熱電対と比べて測定温度差が大きいため、黒煙を測定することにより室内の温度を正確に把握することはできない。黒煙自体と黒煙の奥のものどちらの温度測定を行っているのかを判別することも困難である。また、床面合板発火の有無が放射温度計の温度表示の高低に依らなかったことや予兆を示す傾向等

も観察できなかったため、燃焼拡大の予測をすることは困難であると考えられる。

(イ) 放射温度計測定箇所D（床面）

床面合板の発火が生じた際に熱電対と放射温度計の温度上昇は同時点で起こったため、放射温度計により床面の燃焼拡大が現に生じている状況は捉えることができるものと考えられるが、床面合板の発火が生じる直前の表示温度は数十度の差があることや、実験①で燃焼拡大が生じる直前の温度（300℃）を超えても他の実験パターンでは床面合板の発火が生じないことなどから確定的に燃焼拡大を予測することは難しい。しかし、どの実験パターンも共通して放射温度計の表示温度 200℃付近から床面合板の熱分解が生じ始めており、木材の引火点¹⁾を考慮すれば、床面が 200℃を表示し始めれば、燃焼拡大が生じる危険性が高まると考えられる。

(ウ) 放射温度計測定箇所E、F（壁材裏面）

燃焼室内が数百度に至る燃焼が生じていれば燃焼面の裏側でも 1 分程度で外気温と比較して数十度は上昇しており、さらに時間がたてば 100℃を超える温度まで上昇する。周囲の壁、天井、床等でこのような挙動が観察された場合はその裏側で燃焼による高温状態が生じていると考えられる。不燃材料であれば 20 分間火熱しても防火上有害な損傷が生じる可能性は少ないと考えられるが、燃焼室との間が合板で隔てられている場合は燃焼による燃え抜けがすぐに（今回の実験では点火 3 分後）生じるうため、燃焼室の隣室にいれば非常に危険である。

エ 簡易熱画像装置の活用について

熱画像の画素数の細かさで温度を測定しているため、局所的な温度変化を捉えることができ、色のグラデーションにより温度を可視化しているため、放射温度計と比較して高温な箇所（危険な箇所）を探知する機能に優位性がある。中性帯全体が 500℃を超える高温状態である状況や開口部から噴出する黒煙の状況（図 21）を判断することも可能であり、熱画像により煙等で視界が不良の状況下であっても熱源の存在が確認できる特性もある（図 9）。放射温度計による測定では濃煙発生時に煙とその奥にある物体のどちらの温度を測定しているのか判別が困難であるが、熱画像が確認できる当装置ではこのような判別が容易であるため、温度環境の誤認も招きにくく考えられる。また、色による温度の判別に加え、画像の中心部にある正方形内の温度を画像右下に数値表示する（図 21）。3 m の測定距離で 10cm 角程度の大きさの測定範囲（1:30）となるため、放射温度計よりも局所的な箇所の温度の数値表示も可能である。



図 21 簡易熱画像装置による熱画像
（実験⑤点火 72 秒後に噴出する黒煙の状況）

5 おわりに

本検証を行った結果、次のことが結論として言える。

(1) 放射温度計及び簡易熱画像装置の共通的な特徴について

ア 熱分解による可燃性ガスの発生及び燃焼拡大の危険性が高まる温度（200℃程度）を測定表示することができる。

イ 壁、天井、床等を測定することにより、その裏側での高温状態及び燃え抜けの危険性があることを判断できる。

ウ 温度測定に対して干渉要因（湯気や煙等）の影響を受けやすい。

(2) 放射温度計使用時の注意点

ア 温度を正確に測定するには測定範囲に熱源が収まるよう、適切な距離まで接近する必要がある。

イ 測定範囲の外周部はほとんど赤外線を感じせず、感度が高いのは測定範囲の直径半分程度の大きさである。熱源を探す際はより近くで密に放射温度計の測定範囲を動かす必要がある。2 点式レーザーで測定範囲が示されている場合は、有効な測定範囲を誤認しやすい。

ウ 干渉要因（湯気や煙等）発生環境下では干渉要因とその奥の物体のどちらの温度を測定しているのか判別が困難であり、温度環境の誤認を招く恐れがある。

(3) 簡易熱画像装置について

熱画像を確認できる簡易熱画像装置は放射温度計より以下の点で優れていると言える。

ア 広い範囲の温度分布を瞬時に把握でき、複数箇所を同時に測定できる。

イ 放射温度計ほど接近しなくとも熱源の温度を把握できる。

ウ 煙等で視界が不良の状況下であっても熱源の存在が

確認できる。

エ 干渉要因の影響はあるものの、熱画像から煙とその奥の物体のどちらの温度を測定しているかの判別が容易にできる。

(4) まとめ

放射温度計及び簡易熱画像装置は、温度測定の結果から燃焼拡大の危険性や建材裏側の高温状態の把握する資器材として活用が期待できる。特に簡易熱画像装置は熱画像の確認により、放射温度計では困難なより離れた位置からの熱源の把握や煙発生時の温度環境の把握が比較的容易にできるため、火災現場への導入がさらに強く望まれるものである。

[参考文献]

- 1) 日本火災学会編：「火災と建築」（2002）