

火災室の熱環境の判断に関する検証

田幡 祐基*, 木田 哲夫*, 湯浅 弘章*

概 要

本検証は、消防隊が、現場到着時に火災建物外観の様子から火災室の熱環境などを推察するための指標について、調査、実験を行った。

過去の実大火災実験に関する資料の調査から、火災室の異なる熱環下において、建物開口部からの煙や熱気流の形状及び煙の濃淡にそれぞれ特徴が得られた。この特徴について確認するため、新たな実大火災実験を行い、温度、映像等を取得した。

その結果、建物開口部からの煙の形状及び濃淡から火災室の熱環境が推察できることが確認でき、特にフラッシュオーバーが始まる段階を見分ける指標が得られた。また、熱画像装置を使用することで、火災室の熱環境を推察する一つの判断材料となる可能性があることを示した。さらに、火災シミュレーションソフトを使用し、実大火災実験で使用した区画と取得した温度データを再現した上で、火災室に隣室を付加することで、火災室隣室の熱環境についても検討した。

1 はじめに

消防隊員は、安全で効果的な消防活動を行うために、現場到着時に火災建物外観から火災室の熱環境を推察し、火災の成長段階、建物倒壊危険、逃げ遅れの生存可能性等といった要素を判断する必要がある。また、それら火災性状の変化をいち早く察知し、対応する能力も求められる。

一方で、急激な火災性状の変化を起因とした消防隊員の受傷事案は度々発生している。これまで消防隊員が経験的に察知していた火災性状の変化について、火災発生件数の減少とともに、火災現場で経験する機会が減ってきていると考えられる。

以上のように、火災室の熱環境に対する理解やその推測及び判断に対する必要性は高いものの、それに対する系統立てた知識や教育法は十分ではない。

そこで、本検証では、火災建物外観から火災室の熱環境を判断するため、及び火災の成長段階を推察し、その後の火災性状変化を事前に察知するための指標(以下「外観指標」という。)の作成を目的に、調査及び実験を行った。

2 過去の実大火災実験の資料調査

(1) 調査方法

調査では、火災時の熱環境及び外観的特徴を整理するため、過去の実大火災実験の資料を収集した。調査資料は、出火から火災盛期に至るまでの建物外観の映像及び建物内部の温度データが確認できるもの7件^{1)~7)}とした。表1に調査した過去の実大火災実験を示す。資料ナンバーは文末の参考文献を参照している。

(2) 調査結果

ア 判断要素の抽出

火災室温度と外観映像を突き合わせたところ、建物開口部から出る煙や熱気流の形状及び煙の濃淡に特徴が見られ、表2のように分類できた。

写真からは読み取りづらいが、映像では、開口部から出る煙の上昇速度は火災室温度による違いが顕著であり、煙の形状とも密接に関係すると考えられる。煙の形状は、霧状やすじ状、球状などに分類でき、火災室温度との関連が考えられた。高温の火災室では、煙が渦巻き状に噴出する場合があるが、発生頻度は低く、周囲の風が形状に影響している可能性が考えられる。

また、濃煙が噴出する開口部に火災が現れると、煙が薄くなるとともに火災が急激に拡大することが確認でき

* 装備安全課

表 1 過去の実大火災実験

資料 No	実施 年	建物構造	実験名称	実施場所	実施機関
1)	昭和 56年	防火木造	在来工法木造 住宅実験	つくば市	林業試験場、 建築研究所
2)	昭和 58年	コンクリート造	東村山火災 実験	東村山市	東京消防庁
3)	昭和 61年	コンクリート 一部木造	廃止済み病院 施設火災実験	清水市	東京消防庁、 消防研究所
4)	昭和 62年	木造	総3階戸建 実大火災実験	つくば市	日本ツバーイオー 建築協会、建 築研究所
5)	平成 4年	コンクリート造	消防学校旧第 二校舎実験	渋谷区	東京消防庁
6)	平成 6年	コンクリート造	武蔵野緑町団 地火災実験	武蔵野市	東京消防庁
7)	平成 13年	コンクリート造	日産三ツ木家 族7戸実験	武蔵村山市	東京消防庁

た。これは、熱分解ガスが主体の濃煙に、火炎が伝播し燃焼したためと考えられる。表2に示した温度は資料ナンバー6の武蔵野緑町団地火災実験の数値を目安として示した。開口部からわかる火災室温度は、実験条件によって大きく異なり、すべての実験で必ずしも一致するものではなかった。一方、火炎の噴出や床面への着火から、火災成長期と火災盛期を見分けることは可能と考えられた。

これらの特徴が表れる際の建物外観、火災室の温度、火災成長段階を整理することで、外観指標として活用できる可能性が示唆された。

イ 課題

既往の研究資料では、外部からの映像及び内部の温度測定のみにとどまっており、火災室内部の状況を推測するのに十分ではない。また、近年では、全国の消防本部で熱画像装置や放射温度計の配備が始まっており、これらの活用可能性の検討に必要な資料も不足していることが分かった。

表 2 建物開口部から噴出する煙の分類

火災室 温度目安	実験				分類		
	No.6	No.2	No.3	No.7	火災成長段階	煙の形状	煙の濃淡
200°C 未満					F.O.前	霧状に 拡散	うす煙
							白色
							黒色
						すじ状に 上昇 ~~~~~	濃煙
200°C 以上					F.O.後	球状に 息継ぎ ~~~~~	濃煙
						渦巻き状 に噴出 ~~~~~	濃煙
						火炎と 薄い黒煙	黒色

3 実大火災実験による燃焼状況と外観指標の確認

前2で得られた指標の確認及び火災室内映像や建物外観熱画像データを得るため、実大規模の火災実験にてデータ収集を行った。

(1) 実験方法

本実験は、消防大学校より当庁に依頼された火災調査科の講義において、講義データを取得する一環として、同校の保有する大規模実験棟にて行われた。

実験には図1に示す1Kの間取りの居室(約10㎡、天井高2.3m)を用いた。居室の開口部は、入り口ドア(約1.4㎡)、居室東面の掃き出し窓及び北面の腰高窓(約5.3㎡)の3か所(計約6.7㎡)である。

居室外部ではビデオカメラによる撮影、熱画像装置(Infrec R500EXPRO, 日本アビオニクス社)による外壁や窓部分の温度測定を行った。室内では、K熱電対による温度測定(床面から高さ2.3m、1.5m、1.2m、1.0m、0.8mの5点)、360度カメラ(RICOH THETA V, リコー社)による室内の撮影を行った。配置を図2に示す。

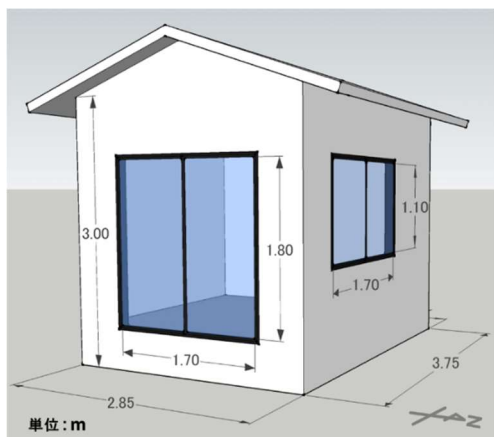


図1 居室の概要

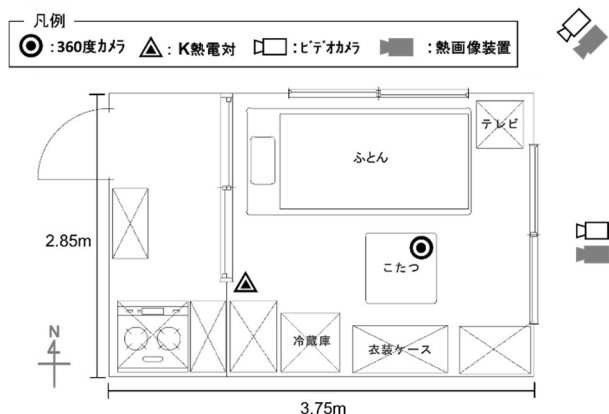


図2 各種測定機材の配置

(2) 実験結果

実験中の居室内の温度データを図3に示す。開口条件の変更については、ドア閉鎖のほかに窓の開口割合の変

化をグラフの右軸として示した。ドアは、点火後火炎が広がり、煙層を形成する程度まで開放し、その後実験終了まで閉鎖している。窓部分は、火災の進展に伴い、とび口により小破壊した部分や、熱割れにより自然に開放された部分がある。開口変化の時系列を表3にまとめた。

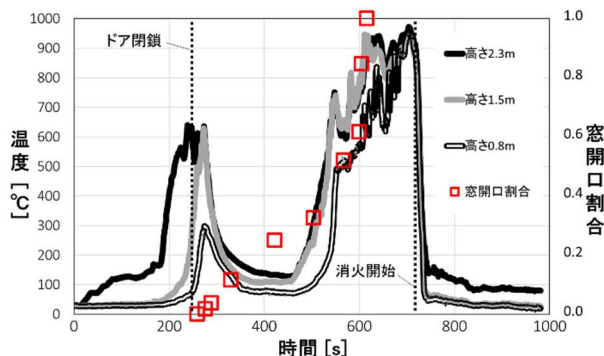


図3 居室内温度及び開口の変化

表3 開口変化

時間[s]	イベント	時間[s]	イベント
0	着火	504	東窓小破壊
259	ドア閉鎖	567	北窓熱割れ
276	東窓熱割れ	600	北窓熱割れ
289	北窓小破壊	605	東窓熱割れ
330	北窓小破壊	616	東窓熱割れ
422	東窓小破壊	700	消火開始

図3より、実験では、二つの温度ピークが表れた。出火以後、天井付近の温度が上昇しはじめ、180秒辺りからさらに温度が急上昇している。その後、低い位置の温度も追従するように急激に温度を上げ始めるが、259秒時点でドアを閉鎖した後、275秒付近で最初の温度ピークをむかえ、以後、そこからすべての高さで100℃台まで温度を下げている。その後、外部からの破壊及び熱割れによって窓が開放されることで燃焼に変化が起きており、500秒付近から数十秒の間に室内温度は700℃を超えるまで上昇して、2度目の温度ピークを迎えている。また、このときの居室内温度は高さ0.8mから2.3mまでほとんど一様となっており、全面火災となっていることがわかる。その後、700秒を過ぎた付近で放水による消火が行われ、温度は急低下している。

360度カメラによる居室内部の撮影は、熱によって撮影が不能となった300秒付近まで行うことができた。図4は、天井付近の温度が急上昇し始めた180秒時点、出入り口のドアが閉鎖される直前の257秒時点、そして最初の温度ピークを迎えた275秒時点の内部映像である。

図4から、高さ2.3mの位置で温度が急上昇したのは、天井に接炎した直後であることがわかる。この時、建物外観は、薄い煙がわずかに見える程度で表2の「うす煙」

で「霧状に拡散」の状態と一致している。

また、ドアを閉鎖する直前 (257 秒)、居室内では、天井に火炎が広がり、部屋の中ほどの高さで延焼が起きているものの、居室入り口が視認できた。この時の建物外観は、ドアから「濃煙」が「すじ状」で直線的に上昇する様子が確認できた。

ドア閉鎖から 16 秒後の最初の温度ピーク (275 秒) の室内映像は、炎がわずかに見える程度で、視界はほとんどない。建物外観も、濃煙の噴出は止まり、屋根全体から白煙が上昇していた。

その後、開口部が増えるごとに、白煙又は濃煙が「すじ状」に噴出しながら、居室内の温度は下がっていき、その外観は、温度が最も下がった 450 秒付近まで続いた。

その後、居室内温度は再び上昇し始め、470 秒付近からは、窓ガラス越しに光る火炎が確認できた。この時、煙の上昇速度が増していき、開口部から息継ぎをするような「球状」の煙が確認できた。その後、520 秒付近で東側窓から火炎が噴出し、火災盛期となった。



図 4 室内 360 度カメラ及び建物外観の映像

また、図 5 は最初の温度ピークである 275 秒時点に外部から撮影した熱画像装置の映像である。この時、室内の温度は高さ 1.5m で 600°C を超える温度を示していた。しかし、図 5 から、熱画像装置による区画外壁及び窓ガラスの高さ 1.5m の温度測定結果はそれぞれ東側が約 85.6°C、北側が 90.6°C であり、どちらも火災室内の温度を直接示す結果とはならなかった。

室内、外壁、窓ガラスの外側の温度測定結果の時間変化についてまとめたのが図 6 である。黒い連続線と破線は、それぞれ東側の窓の同じ部分を正面と斜めから測定した結果である。このように、同じ部分を測定していても、測定する角度によって値が異なることがわかる。窓

ガラス外側の温度は、室内の急激な温度上昇から少し遅れて 150 度程度まで上昇し、その後は定常状態となった。一方、外壁の温度測定結果は、室内の変化にあまり影響されず、緩やかに上昇している。

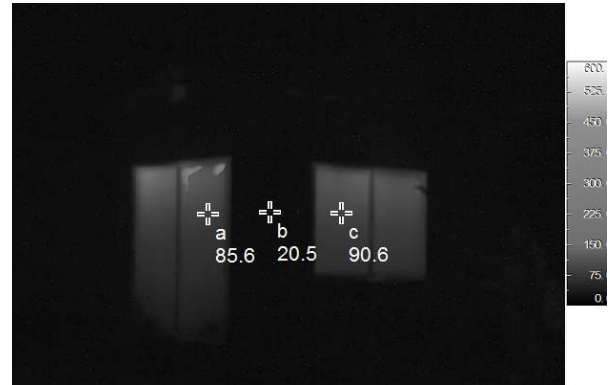


図 5 出火から 275 秒時点の熱画像

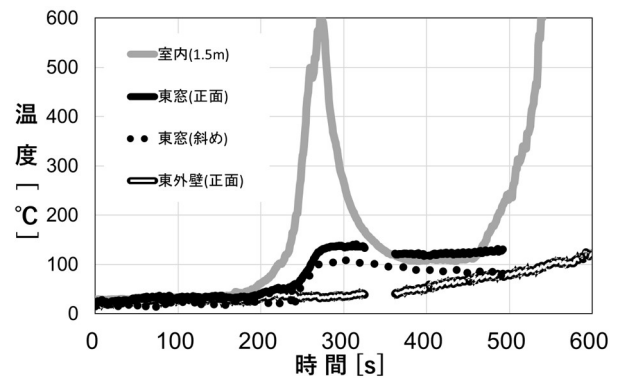


図 6 火災室内温度と熱画像装置の温度測定結果

4 外観指標の検討

(1) 開口部や煙の様子について

外観指標のまとめを表 4 に示す。外観指標と温度の関係は、表 2 の建物開口部から噴出する煙の分類で示した煙の形状と温度の関係に類似した傾向を示した。表 4 では、表 2 で白煙や黒煙又は霧状やすじ状と示していた単語でなく、より包括的なくつかの文言に整理した。

「煙が薄く拡散」及び「煙が開口部上端から流出」している状況は、表 2 で示した霧状やすじ状の煙であり、火災初期から急激に温度上昇するまでの間の状態であることが推察できる。また、「煙が隙間から漏れい」している状況は、燃焼が継続しているものの、酸欠により抑制されているか、放射熱による周囲の可燃物の熱分解が起きていない状況であり、検索活動は可能な熱環境である可能性が高い。しかし、外気の流入により急激な火災性状の変化するおそれがあり、十分に注意する必要がある。

一方、「内部に火炎が出現」、「多量の煙が勢よく噴出」及び「火炎が噴出」している状況からは、急激な温度上昇を経て高温であることが推察できる。これらの状況

では、消防隊による検索活動は不可能である。

これらの特徴は相対的な危険度判断や、その後の火災成長段階の変化を推察する要素となりうる。

(2) 熱画像装置による温度測定について

図 6 より、室内温度が 600℃を示しているも、熱画像装置による窓ガラス面の温度測定結果は 150℃未満と低い温度を示していた。同じ面に対して正面から撮影した時の温度と、斜めから撮影した時の温度を比較しても、わずかに正面が高くなるだけであり、室内温度との差に比べると著しく小さかった。本実験で使用した熱画像装置の使用波長は 8~14μm であり、通常板状のフロートガラスに対しては不透明といえる範囲である。ガラスの放射率は、温度によって変化し、20℃から 1500℃の範囲で 0.94~0.67 であった⁸⁾。しかし、仮に放射率を 0.7 と設定しても、室内温度ほどは高い値とならず、火災室内に対してガラス面の温度が低く表れる原因とはいえない。厳密にはガラスの種類や厚さによって細かく設定する必要があり、火災現場での使用を想定すると、これらを考慮するのは困難である。

窓ガラス外側の温度は、室内温度への追従に時間差があり、一定以上の高温を示さない場合があることから、急激な温度変化を察知することは困難である。しかし、室内の実温度よりは低いものの外気や外壁より相対的には高い温度となることから、開口部がない場合には窓ガ

ラス外側の測定が熱環境を推察する一つの判断材料となる可能性がある。

なお、外壁温度は室内温度の影響をほとんど受けておらず、火災室温度を推察する材料には不相当である。

(3) 火災シミュレーションにより拡張した空間の熱環境

通常、消防隊は火災室の隣室で活動することが多いことから、実験で用いた火災室に隣室があったと仮定した場合の隣室の熱環境を、火災室の温度履歴からシミュレーションで再現した。

ア シミュレーションの作成

火災シミュレーションは、解析ソフトとして NIST (アメリカ国立標準技術研究所) による Fire Dynamic Simulator Ver6.6.0 を使用し、セルサイズを 0.1m 角で作成した。

まず、火災シミュレーションに実大火災実験で用いた区画を入力し、計算温度を算出した。計算対象とした時間は、実大火災実験中の熱環境の変化を捉えるため、着火から火災盛期 (経過時間 600 秒) までの間とした。火源は、1 K 中の寝室床面全面とし、発熱速度と水平燃え広がり速度を変化させた時に、実大火災実験における居室の温度変化の傾向を再現している値を火源条件とした。開口部は、実大火災実験時での窓ガラスの破損及び熱割れ並びにドアの開閉状況 (表 3 及び図 3) を開口条件とした。

表 4 外観指標のまとめ

外観指標	●煙が薄く拡散 ●煙が開口部上端から流出	●煙が隙間から漏えい	●内部に火炎が出現 ●多量の煙が勢よく噴出	●火炎が噴出
火災室の温度 (実大燃焼実験高さ 100cm)	100℃以下	100℃以上	200℃以上	600℃以上
火災成長段階	火災初期 (局所的に燃焼)	(くん焼状態)	急激な温度上昇	火災盛期
検索可否判断	可能~注意	注意~危険	不可能	
既往の研究 武蔵野緑地団地実験 (平成 6 年東京消防庁)				
実大燃焼実験 (外観)				
実大燃焼実験 (内観)				
火災 シミュレーション による隣室の状況				

※画像の配置は外観指標に合わせたものであり、必ずしも時系列とは合わない

次に、隣室として、同じ大きさの区画を掃き出し窓の面と接続する形で作成し、計算温度を算出した。

イ シミュレーション結果

表 4 の下段にアニメーションで可視化した結果を示す。また、図 7 に火災室と隣室の温度変化を示す。

シミュレーション結果から、火災室の外観が「火炎が噴出している」状況では、火災室の隣室中心部分で 200℃ を超える温度となっていた。収容物の引火温度（例えばスギ材で 240℃）⁹⁾ を考慮すれば、実際の火災現場ではいつ火災盛期に移行してもおかしくない、注意が必要な熱環境である可能性が推察できた。

よって、火災室の外観が「火炎が噴出している」状況では、隣室も短時間で急激に温度上昇する場合があると考えられる。

実大火災実験のデータを応用することで、火点室以外の部屋の熱環境を推察することができる指標を示すことができた。

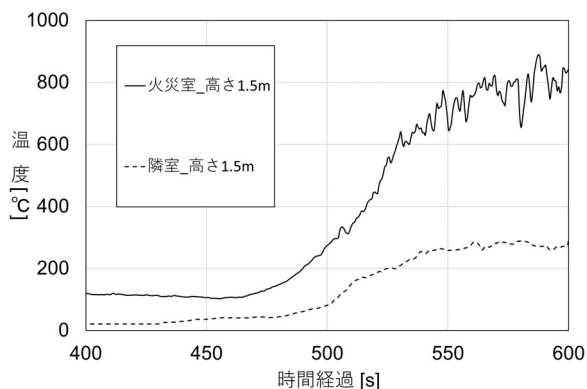


図 7 火災室と隣室の温度変化

5 燃烧により発生する煙の色の確認

煙の色については、フラッシュオーバーの兆候として褐色の煙などがあり¹⁰⁾、火災室内の環境を予測する指標として期待される。

しかし、前 2 の過去の実大火災実験の映像の中でも、フラッシュオーバー前に褐色や黄味を帯びた煙が確認できた実験とそうでない実験があった。この差異が、熱環境ではなく、燃焼物の素材の違いにあると考え、実験により検証した。

(1) 煙の色について

熱分解や燃焼によって発生する各生成物の発生を図 8 のように分類した。可燃物は、加熱されると熱分解を起こし、熱分解ガスと残渣に分かれる。さらに、熱分解ガスは燃焼反応によって、すす、未反応ガス、湯気及び燃焼生成ガスに分かれる。

図 8 の分類のうち、すすは、不完全燃焼によって発生した炭素の塊であり、黒く発色すると考えられる。また、湯気は、水蒸気の液化成分であり、白く発色する。さらに、燃焼生成ガス（例えば H₂O, CO₂, CO など）の多くは透

明であることから、煙の呈色に最も影響するのは未反応ガスであると考えられる。

そこで、実験では、熱分解ガスを燃焼させるのではなく、未反応のまま観察することとした。

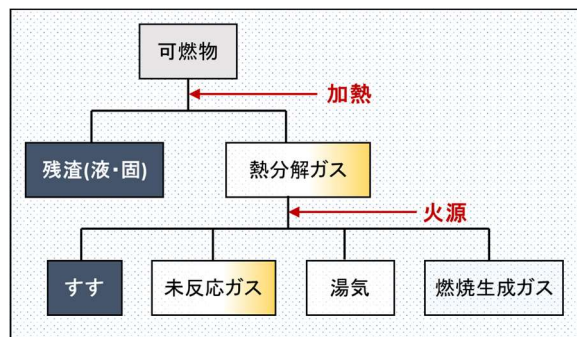


図 8 燃焼によって発生する各生成物の分類

(2) 実験方法

燃焼物ごとの煙の色について、実験試料を使った卓上燃焼実験で確認した。実験の概要図を図 9 に、使用した試料を表 5 に示す。

実験では、各試料を試験管の中に入れ、空気穴をあけたゴム栓で栓をし、ガスバーナーにより熱した。試験管内や空気穴から噴出する熱分解ガスを撮影し、その色を観察した。

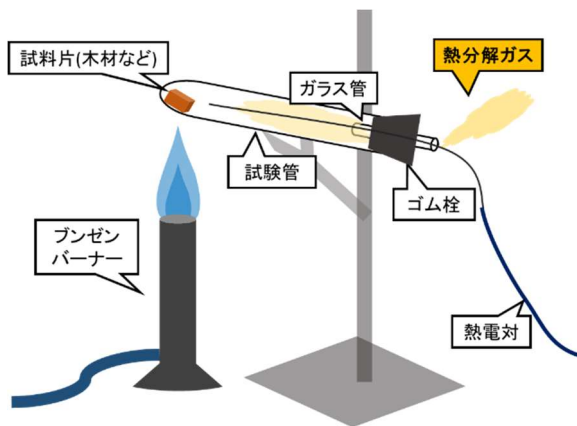


図 9 実験の概要図

表 5 実験で使用した試料

No.	試料名	重さ [g]	製品
1	木材	6.0	木材クリブ (スギ)
2	綿	2.5	脱脂綿
3	ポリエチレン	1.5	発泡ポリエチレン
4	ポリスチレン	1.1	発泡スチロール
5	ポリウレタン	0.8	イソシアネート系発泡ポリウレタン

(3) 実験結果

実験の結果を表 6 に示す。木材及び綿から発生した熱分解ガスの色はよく似ており、黄味がかった不透明な色であった。ポリエチレン及びポリスチレンでは、薄い白色の熱分解ガスがわずかに発生するのみであった。一方で、ポリウレタンでの実験結果は木材及び綿に比べて発生量は少ないものの、高温の雰囲気下で黄褐色の熱分解ガスが確認された。これにより、同じプラスチック製品にも、樹脂種別によって熱分解ガスの発色に違いがあることが分かった。

(4) 考察

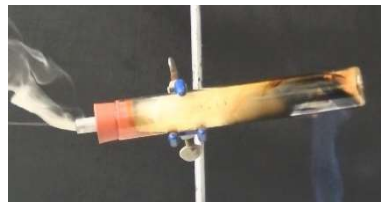
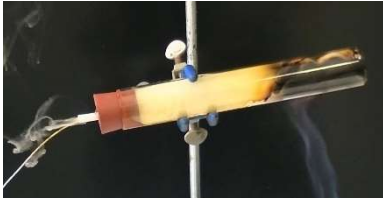
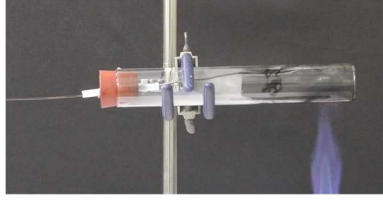
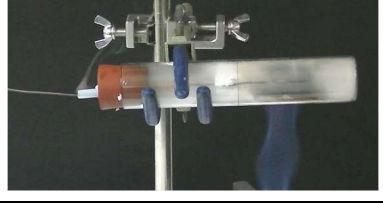
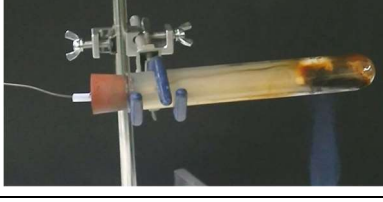
今回の実験では、木材、綿及びポリウレタンから黄味がかった熱分解ガスが確認されたものの、ポリエチレン及びポリスチレンでは確認できなかった。このことから、フラッシュオーバー前の開口部から噴出する煙の色は、燃焼物の素材で異なる可能性が考えられる。また、実際の火災現場では、熱分解ガスだけでなく、燃焼によるすすの発生があり、表 6 のような熱分解ガスのみを視認することはない。実際には図 10 のように、すすや湯気、白色の未反応ガス、黄色の未反応ガスが混在し、それらのバランスで色が変わると考えられる。黄味がかった熱分解ガスを発生させる物質が火災現場にあったとしても、すすや湯気、白色の未反応ガスの発生が顕著であれば、煙は黒色から灰色を呈することが予想される。

6 まとめ

消防隊が、現着時に火災建物外観の様子から火災室の熱環境などを推察するための指標を作成すべく、検証を行った。その結果、次のような指標が得られた。

- (1) 表 4 より、「煙が隙間から漏えい」している状況は、検索活動は可能な熱環境である可能性が高いが、外気の流入により急激な火災性状の変化するおそれがあり、十分に注意する必要がある。
- (2) 火災室の外観が「内部に火炎が出現」、「多量の煙が勢いよく噴出」及び「火炎が噴出」している状況では、火災室内は高温であり、検索不可能な熱環境であることを確認した。また、これらの段階はフラッシュオーバーが始まる段階であることが確認できた。
- (3) 熱画像装置は、窓ガラス部分など測定部を選ぶことで、相対的な高温環境の推察は可能であることが分かった。
- (4) 火災シミュレーションを活用し、実験で得られた熱環境を隣室などに拡張することで、火災室の外観が「火炎が噴出している」状況では、隣室も短時間で急激に温度上昇することを確認した。
- (5) 開口部から噴出する煙の色は、燃焼物の素材により決定する可能性を示した。

表 6 熱分解ガス発生の様子

試料名	写真
木材	
綿	
ポリエチレン	
ポリスチレン	
ポリウレタン	

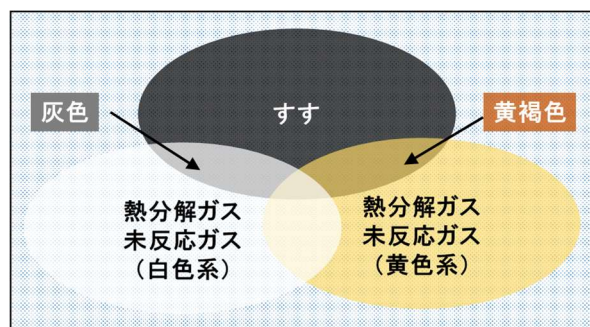


図 10 煙の組成と呈色

7 おわりに

以上のように、建物火災の外観から、火災の各フェーズや温度を推察する指標が得られた。しかし、これらの指標は、火災の状況と 1 対 1 で対応するような単純なものではなく、複数の要素を総合的に判断することではじめ

て火災の状況を知ることができるものである。また、指標である煙の色や形状などは定性的な分類であり、現場で活用するためには、映像資料などによる学習が必要となる。よって、本報の指標を教えれば誰でも火災の状況について理解できるものとはならなかった。

したがって、今回得られた指標を活用するためには、映像と室内環境を対比した教材を用い、パターン学習により指標について理解を深めることでより効果的になると考えられる。

本検証では、実験によって得られた映像や過去のデータを用いた教養動画も作成している。今後はこれらを実務資料として当庁職員に周知し、本報の結果と併せて火災建物外観の様子から火災室の熱環境などを推察するための教養資料として活用してもらう予定である。

8 謝辞

本検証の実施に際して、総務省消防庁消防大学校消防研究センター大規模火災研究室長の田村裕之先生より、多くの貴重な助言を賜りました。また、同センター及び消防大学校の皆様には、実験施設の御提供並びにデータ採取に御協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 上杉三郎：在来工法木造住宅の実大火災実験、林業試験場研究報告、322号、pp.1-30、1983
- 2) 東京消防庁消防科学研究所：東村山火災実験結果報告書、1984
- 3) 東京消防庁消防科学研究所：廃止済み病院施設を使用した火災実験報告書、1986
- 4) 建築研究所、(社)ツーバイフォー建築協会：総3階建て2×4実大火災実験共同研究報告書、1988
- 5) 真下薫雄、ほか2名：小区画の火災性状—実大火災実験—、消防科学研究所報、第30号、pp.7-13、1993
- 6) 平沢正己、ほか3名：フラッシュオーバーに関する研究（その8）共同住宅を使用した実大火災実験、消防科学研究所報、第32号、pp.27-35、1995
- 7) 渡邊茂男、ほか4名：消火活動における消火剤の有効性に関する研究（その4．実大建物火災消火実験2）、消防科学研究所報、第38号、pp.20-26、2001
- 8) 日本アビオニクス株式会社 HP：各物質の放射率、<https://www.avio.co.jp/products/infrared/support/thermo/technical/emissivity.html>、2021年3月9日閲覧
- 9) 日本火災学会：火災便覧第4版、共立出版、2018
- 10) 鈴木唯一郎、ほか3名：フラッシュオーバーに関する研究（その2）—簡易な模型燃焼室による予備実験—、消防科学研究所報、第25号、pp.65-73、1988

Study on the Evaluation of the Thermal Environment of a Burning Room

TABATA Yuuki*, KIDA Tetsuo*, YUASA Hiroaki*

Abstract

In this study, the fire department examined and experimented with the indices for inferring the thermal environment of a burning room on arrival at the fire scene from the appearance of the burning building. Investigation of the material from previous fire experiments, features such as the shape of smoke and hot air flow from the openings in the building and the shadow of smoke under different fires in the burning room were obtained. To confirm these features, a new experiment was conducted, and temperature, video, and other information were acquired.

The results confirmed that the thermal environment of the burning room could be inferred from the shape and shadow of the smoke coming from the openings in the building, and indices were obtained to specifically understand the stage at which flashover began. In addition, using a thermal imaging device was shown to be useful for inferring the thermal environment of the burning room. Furthermore, using a fire simulation software, we reproduced the compartment used in the experiment as well as the acquired temperature data, and by adding an adjacent room we were able to examine the thermal environment of the room next to the site of a fire.

*Equipment Safety Section