

熱画像装置による階層間の延焼拡大の危険察知に関する検証

田幡 祐基*, 木田 哲夫**, 湯浅 弘章***

概 要

本検証では、熱画像装置を活用した木造住宅の天井裏や2階部分の床下など（以下、「階層間」という）の延焼拡大の察知及び検索時の踏み抜け危険のある温度について実験を行い検証した。実験は、階層間を模した1畳程度の大きさの試験体をバーナーで加熱し、その表面を熱画像装置により撮影することで行った。

その結果、床面を映した場合、フローリングの床は床下の延焼拡大を察知することができる可能性が高いことがわかった。天井面を映した場合、標準的な仕様の天井は床面を映した場合よりも明確に天井裏の延焼拡大を察知できた。また、床材の厚さによらず床表面の温度が100℃以上で踏み抜き危険の高い状態とする指標を提案した。

1 はじめに

当庁の過去の木造住宅火災事例では、熱気はなく薄い煙が漂う状況での検索活動中に、階層間からの急激な延焼拡大によって退避ができずに受傷に至る事案や、延焼によって脆弱化した床を踏抜いて受傷したとみられる事案などが発生している。在来工法の木造住宅は通気性を確保する構造であるため、階層間に火が入ると、対流熱による平面的な延焼拡大が急速に進展することがある。

この階層間の延焼拡大を消防隊員がいち早く察知することができれば、脱出や消火等の対応が可能となり、安全な活動につながると考えられる。

過去の検証¹⁾では、石膏ボードや合板で遮られて直に確認できない箇所の燃焼状況について、熱画像装置を使用することにより燃焼の有無を察知できる可能性が示唆されている。しかし、これまで延焼中の床面や天井面を熱画像装置により撮影した検証は行われておらず、階層間の燃焼状況を察知するための知見が十分でない。

そこで、本検証では木造住宅の階層間模型を作成し燃焼実験及び荷重実験を行い、「階層間の延焼」と「焼損による床面の脆弱化」を察知するために消防隊が着目すべき熱画像の整理を目的に、実験を行った。

2 実験期間及び場所

- (1) 実験期間
令和3年11月8日から11月26日まで
- (2) 場所
東京消防庁消防技術安全所燃焼実験棟

3 燃焼実験

階層間に延焼拡大した場合の天井面及び床面の熱画像について確認するため、階層間を模した試験体を作成して燃焼実験を行った。実験では、試験体内部を火源（バーナー）からの炎で加熱することにより、階層間に延焼拡大した状況を再現した。

(1) 実験方法

ア 試験体の概要

試験体の外観を写真1に、各部の寸法及び名称を図1に示す。また、各試験体の仕様を表1に、各床材の詳細を表2に、各試験体共通部分の仕様を表3に示す。試験体の寸法は、幅910mm×長さ1820mmとし、大引きや根太など内部の構造は、現場で施工されているものを参考とし作成した。

床材及び天井材の裏面の温度は、図1内A-A'断面図に⊗で示す位置においてK型熱電対により測定した。



写真 1 試験体の外観

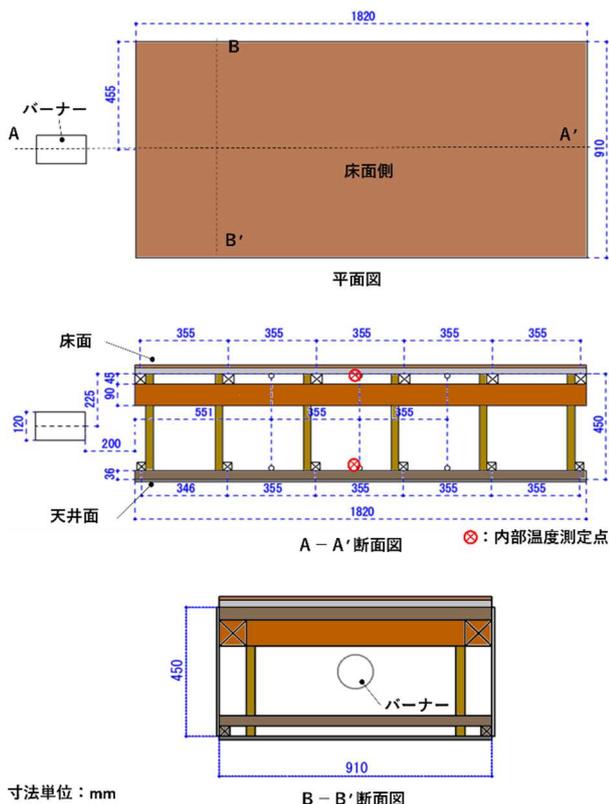


図 1 試験体の各部寸法及び名称

表 1 各試験体の仕様

No.	床材1(厚さ)	床材2(厚さ)	天井材(厚さ)
1	フローリング板 12 mm	構造用合板 24 mm	石膏ボード [*] 15 mm
2	フローリング板 12 mm	構造用合板 24 mm	石膏ボード [*] 12.5 mm
3	フローリング板 12 mm	構造用合板 18 mm	石膏ボード [*] 12.5 mm
4	フローリング板 12 mm	構造用合板 12 mm	石膏ボード [*] 12.5 mm
5	フローリング板 12 mm	なし	石膏ボード [*] 9.5 mm
6	畳 60 mm	構造用合板 9 mm	石膏ボード [*] 9.5 mm
7	フローリング板 12 mm	なし	ラワン合板 3 mm

表 2 各床材詳細

名称	仕様等
フローリング	厚さ 12 mm、3 層構造幅 303 mm を 3 枚つなぎ
畳	厚さ 60 mm、畳表にイ草、内部に発泡 PS 使用

表 3 試験体共通部分の仕様

部位	名称	仕様等
床材	下地	構造用合板(厚さ 9~24 mm)
	根太	杉材(太さ 45×45 mm)
構造材	大引	杉材(太さ 90×90 mm)
	吊り木	杉材(太さ 30×30 mm)
	野縁受	杉材(太さ 36×36 mm)
	野縁	杉材(太さ 36×36 mm)

イ 火源

初期火源としたバーナーの概要を表 4、外観を図 2 に示す。予備実験では、バーナー出力が大きいと短時間で階層間内が火炎で覆われてしまう一方で、バーナー出力が小さいと階層間内の木質部が燃焼及び炭化しないことが分かった。そこで、バーナー出力は、床材裏面中央の受熱量が無炎燃焼から有炎延焼拡大する最低の加熱強度といわれる 20kW/m² となるように調整した。なお、このときの天井材裏面中央の受熱量は 6 kW/m² であった。

バーナーによる加熱は、階層間区画がフラッシュオーバーから火災盛期に移行した後に速やかに停止することとした。

表 4 火源

機器	バーナー(コロ製 M-10K)
燃料	LPG
燃料流量	3.0 m ³ /h
出力*	80kW(7100kW/m ²)
火口径	直径 12 cm



*出力は燃料流量及び火口面積から算出した

図 2 火源

ウ 熱画像装置

床材及び天井材の表面の温度を熱画像装置により撮影し測定した。使用した熱画像装置を図 3 に示す。実験では、主に「実験用」を用い、熱画像データを 3 秒間隔で撮影した。また、当庁の消防隊が火災現場で使用している「消防隊用」は、実験用との比較を目的に、一部の実験において 1 分間隔で撮影した。

<p>日本アビオニクス(株)製 品名: R550-Pro 設定レンジ: 0~600°C 画素: 640×480</p>	<p>FLIR(株)製 品名: K1 設定レンジ: -10~400°C 画素: 160×120</p>
実験用	消防隊用

図 3 使用した熱画像装置

エ 実験設定

試験体、火源、熱画像装置の配置状況を図4に示す。試験体は、床面及び天井面を同時に撮影するため、台座により高さ1.5m程度に設置した。床面を撮影する熱画像装置の配置は、消防隊員が胸の高さ（試験体床面から高さ1.5m）に構えて1～2m前方の床面を映す状況を想定し設定した。また、天井面を撮影する熱画像装置は、隊員が頭の高さ（試験体天井面から高さ1.2m）に構えて1～2m前方の天井面を映す状況を想定し設定した。



図4 実験設定

オ 実験条件

試験体は表1の通り床材及び天井材の厚さと素材を変えた計7種類について実施した。床材に用いた構造用合板は、住宅金融支援機構フラット35住宅仕様実態調査報告(平成29年)²⁾を参考に複数の厚みを選定した。また、過去の事故事例調査結果から、構造用合板を用いていない試験体も作成した。フローリングは、市販品の中から一般的な構造のものを選んだ。畳は、近年多く使用されている発泡ポリスチレン及び木質系の繊維板(インシュレーションボード)³⁾を用いたものとした。天井材は、一般的な木造住宅で使われる石膏ボード及び合板とした。

(2) 実験結果

ア 燃焼状況の概要

例として、床材及び天井材裏面の雰囲気温度推移及び階層間内部の加熱後の時間経過状況を図5に示す。床材裏面温度は、全ての実験で加熱開始から10分後に400℃付近まで上昇した。天井裏面温度は、全ての実験で加熱開始から10分後に100℃から200℃の間まで上昇した。加熱開始後は、床材裏面中心付近の構造用合板や根太等が局所的に炭化または赤熱する状況が続いた。その後、局所的な炎燃焼の発生につき非常に短時間で階層間に燃え拡がり、フラッシュオーバーを経て火災盛期となった。天井材が合板の場合、天井材裏面に着火後、天井材表面にも非常に短時間で燃え拡がった。フラッシュオーバーのタイミングは実験ごとにばらつきがあり、床材や天井材の種類との関係性は見られなかった。

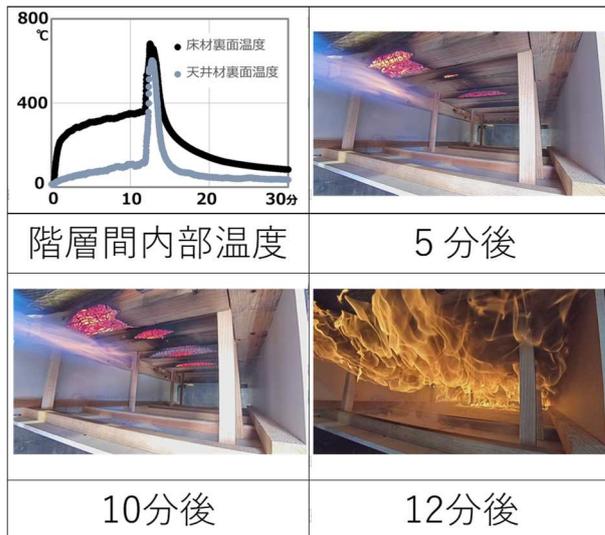


図5 階層間内部 (実験No.2)

イ 床表面

加熱時の床表面は、フローリング及び畳ともに、可燃性ガスや水蒸気のような白煙の発生などの目視上での特徴はなかった。例として、最も薄い床材を使用した試験体No.5及び畳材を使用した試験体No.6の加熱開始から15分後の床表面の可視画像を図6に示す。両画像の左部分には薄煙が見えるが、これは試験体内部で発生した薄煙が開口部から漂っているものである。

実験ごとの床表面の熱画像等について、図7に示す。フローリングを用いた全て試験体で、床表面の温度上昇が確認できた。また、床面の厚さが同じ実験の熱画像は類似の傾向があった。床材が厚くなるにつれて、時間当たりの温度上昇は小さくなる傾向が見られた。床下に根太がある箇所とそうでない箇所で床表面温度が異なり、熱画像からは根太の位置が判別できた。

畳材では、表面の温度上昇はほとんど見られず、熱画像で根太の位置を判別することもできなかった。

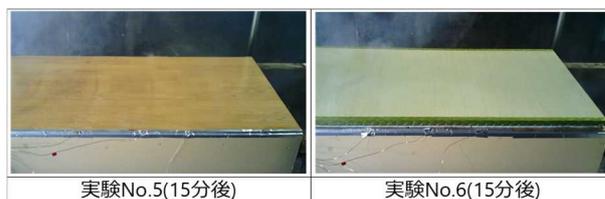


図6 床材表面の可視画像 (実験開始15分後)

ウ 天井表面

実験中に天井表面から白煙の発生などの目視上での特徴はなかった。例として、試験体中で最も薄い石膏ボードの天井材を使用した試験体No.5の実験開始から15分後の天井表面の可視画像を写真2に示す。

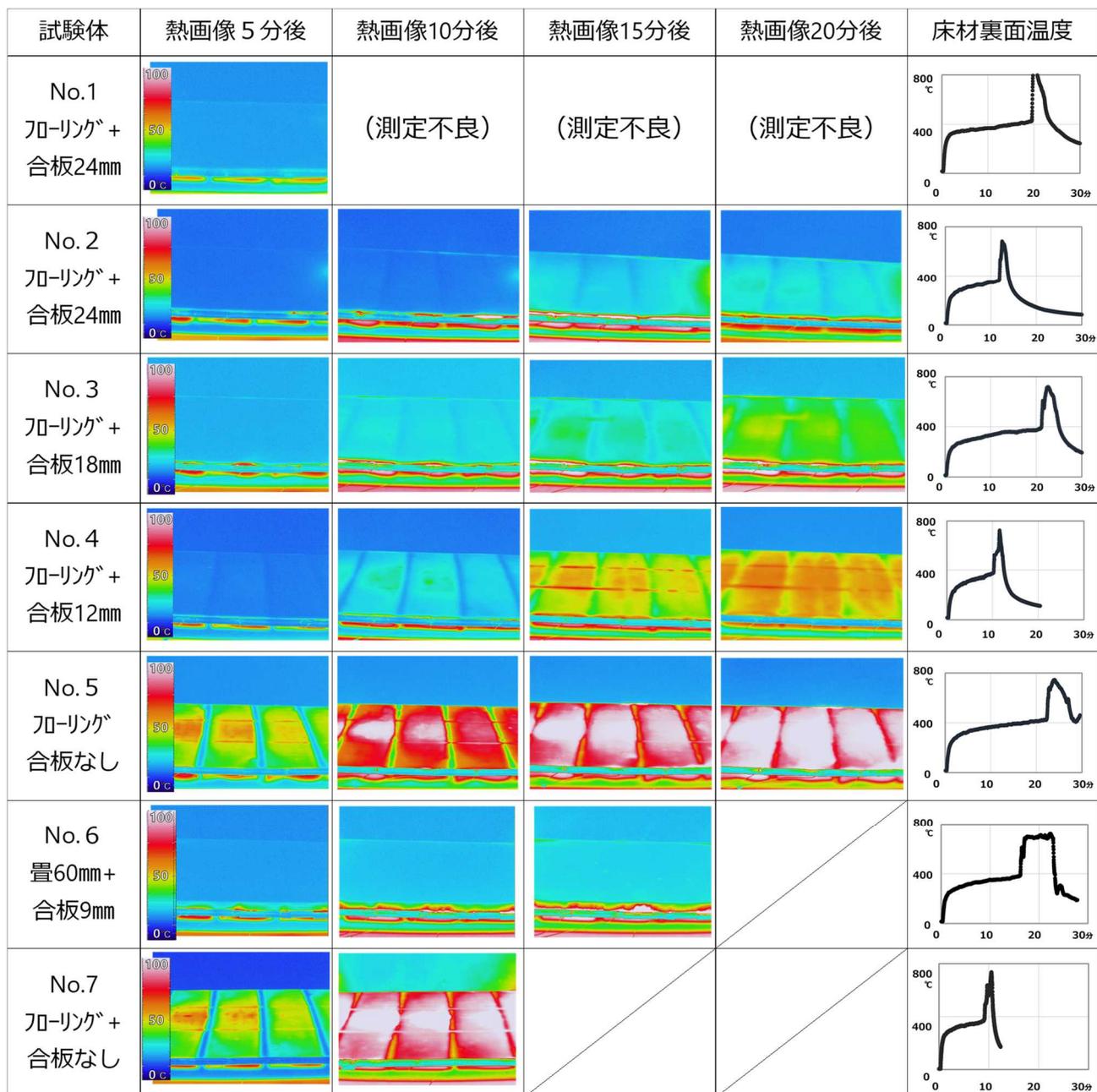


図 7 床面の熱画像表示の変化



写真 2 天井材表面の可視画像 (実験開始 15分後)

実験ごとの天井表面の熱画像等について図8に示す。天井材表面の熱画像による測定結果では、全ての試験体で床材よりも顕著に温度上昇が確認できた。また、天井材が厚くなるにつれて同じ加熱時間でも温度上昇は小さくなる傾向が見られた。また、天井裏に野縁がある箇所とそうでない箇所で天井表面温度が異なり、熱画像からも野縁の位置が判別できた。

エ 消防隊用熱画像装置

試験体No.6の加熱開始から5分後の床表面に対して実験用と消防隊用で撮影した熱画像を図9に示す。実験用と消防隊用の熱画像装置はいずれも根太の位置が判別でき、床表面温度の測定結果に大きな差は見られなかった。

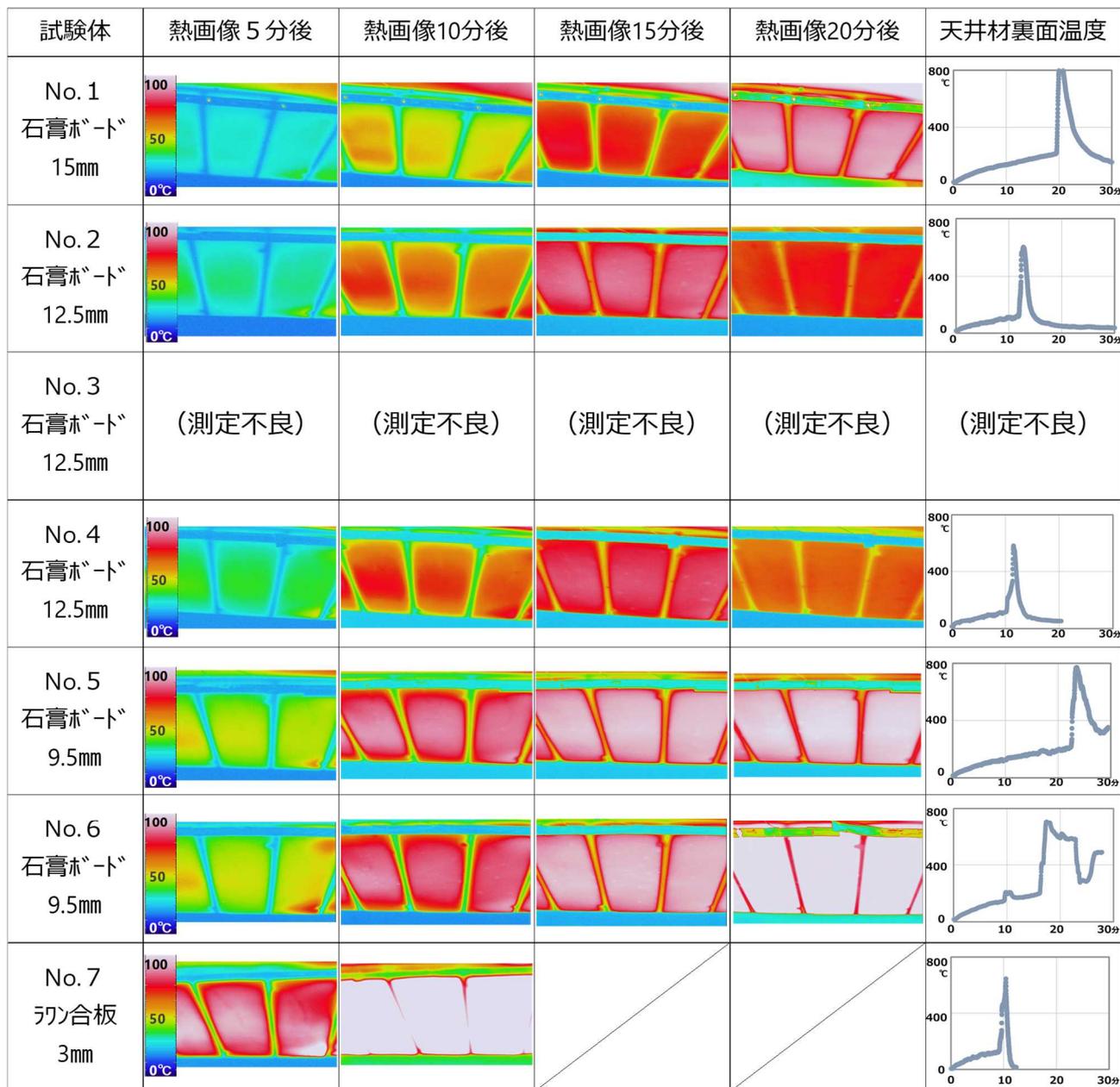


図 8 天井面の熱画像表示の変化

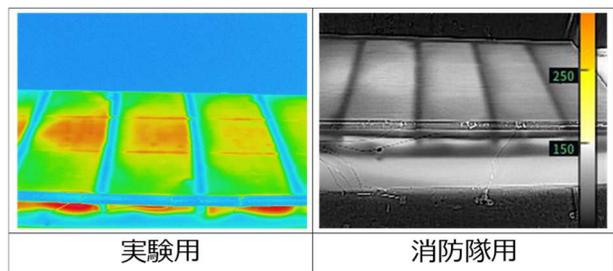


図 9 熱画像装置の比較

オ 床面への放水

試験体No.7の加熱開始から10分後に床面へ放水した際の熱画像を図10に示す。放水前の床面温度は107℃で

あるが、放水により濡れた部分は28℃まで低下し、階層間の燃焼察知が難しくなった。しかし、放水が直接かかっていない部分の温度低下は小さく、放水を停止すると、徐々に元の温度に戻っていった。

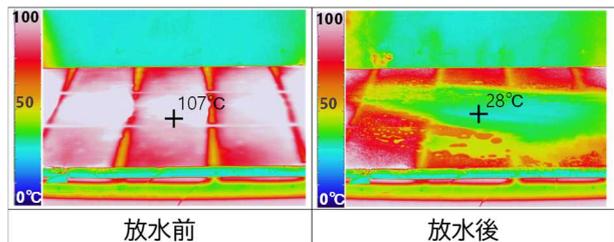


図 10 熱画像表示の変化

(3) 考察

床面及び天井面の熱画像で最も注目すべきことは、根太又は野縁があたかも透けているかのように確認できることである。仮に熱画像が室内側の熱を反映しているのであれば、表面温度は均一となり、図7や図8のような見え方はしないと考えられる。根太又は野縁が見えるということが、内部に熱源があり、その熱を熱画像で見ているということを示す現場での大きな根拠となると考えられる。

ア 床面から階層間の燃焼を判別する場合

床材がフローリングの場合、階層間が局所的に赤熱及び炭化している状況で床表面の温度上昇がみられた。床材の薄い実験No.5では加熱開始から5分後には、床面の最高温度が60℃近くまで上昇しており、床下に熱源がある可能性を示唆する結果となっている。一方、同じ加熱時間でも、床材が厚いほど床材表面の温度変化は小さい。最も床材の厚い実験No.2の加熱開始から15分後では、床表面の温度は25℃程度であり、火災現場としては異常とは言えない温度である。しかし、熱画像上では内部に根太のある部分とない部分で色のコントラストがあり、根太の位置が判別できる程の温度差が確認できた。このことから、部分的な温度測定では階層間に熱気があることを推測することは困難であるが、熱画像により床面を広く撮影することで床面の温度差を確認すれば、階層間の燃焼の有無について察知できると考えられる。

床材が畳の場合、床材裏面が局所的に赤熱及び炭化している状況でも床表面の温度上昇がみられず、熱画像上でも根太の位置が判別できる程の温度差がなかった。畳は図11のように断熱性のある素材で作られており、厚みも大きいいため、床材裏面の加熱や燃焼による熱が畳表面まで伝わりづらく、表面温度が低くても根太や構造用合板、畳が焼損している場合があると考えられる。このことから、階層間の燃焼の有無を察知することは難しいと考えられる。

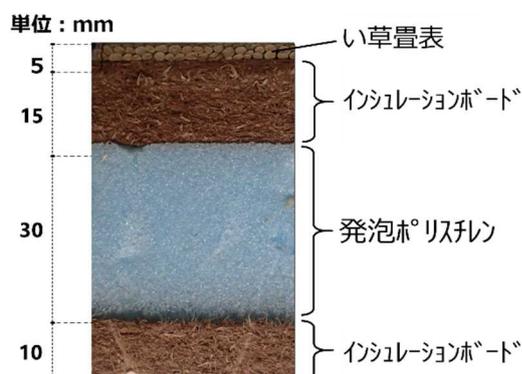


図 11 畳材の断面構成

イ 天井面から階層間の燃焼を判別する場合

天井材の場合、階層間が局所的に赤熱及び炭化してい

る状況で天井表面の温度上昇が確認できるとともに、野縁の位置が判別できる程の温度差が熱画像上で確認できた。また、床面に比べ、野縁の有無による表面の温度差も大きかった。ことから、天井材の表面においても床面と同様の方法で、より明確に階層間の燃焼の有無について察知できると考えられる。

ウ その他

図9に示した実験用熱画像装置の比較結果から、実験用で高温であることが判別できれば、消防隊用でも同レベルの精度で判別可能であることが示された。

また、放水による影響は、水がかかった部分を中心に局所的な温度低下にとどまり、加熱がない場合の床面との区別は容易にできた。このことから、火災現場においても、床全面を覆う放水が継続的に行われなければ燃焼察知への影響はないと考えられる。

4 荷重実験

床表面の温度と踏み抜けの関係を確認するため、所定の温度に到達後に速やかに燃焼を停止させた試験体に対し、消防隊員が床上で動いた場合を想定した荷重実験を行い、踏み抜けの有無等を確認した。

(1) 実験方法

ア 焼損試験体の作成

荷重実験では、焼損した階層間を再現するため、作成模型を加熱し燃焼させ、複数の焼損試験体を作成した。作成模型は、前3(1)アに示す試験体から吊り木、野縁受、野縁、天井材を無くしたものとした。

事前実験から、表面温度160℃前後が踏み抜けの有無に差が生じる温度と推測し、焼損試験体ごとに燃焼停止させる表面温度を決定した。表5に実験で用いた焼損試験体を示す。床表面の温度測定には、図3に示す実験用の熱画像装置を使用した。実験ABCは、前3「燃焼実験」と同様に作成模型を水平に設置し加熱した。実験DEFは、図12及び図13に示すよう作成模型を垂直に設置した。

焼損試験体の作成は、作成模型の階層間部分をバーナーにより加熱、床材表面の温度が加熱停止温度に到達した時点でバーナーを停止し、床材裏面に散水ホースで放水して燃焼を停止させる、という手順で実施した。

表 5 荷重実験に用いた焼損試験体

	床材1(厚さ)	床材2(厚さ)	加熱停止温度※
A	フローリング板 12 mm	なし	150℃
B	フローリング板 12 mm		160℃
C	フローリング板 12 mm		170℃
D	フローリング板 12 mm	構造用合板 9 mm	160℃
E	フローリング板 12 mm	構造用合板 12 mm	
F	フローリング板 12 mm	構造用合板 18 mm	

※加熱を停止し、燃焼を止めるために放水を開始した床表面温度

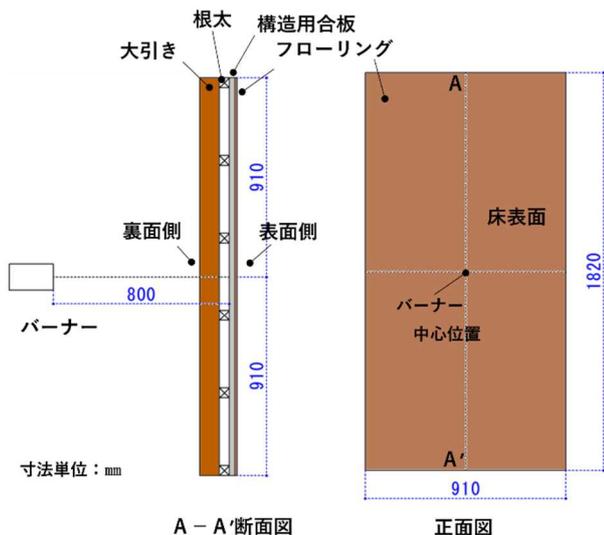


図 12 作成模型 (実験 DEF)

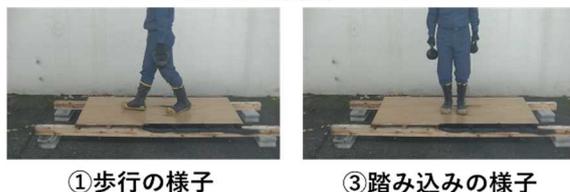
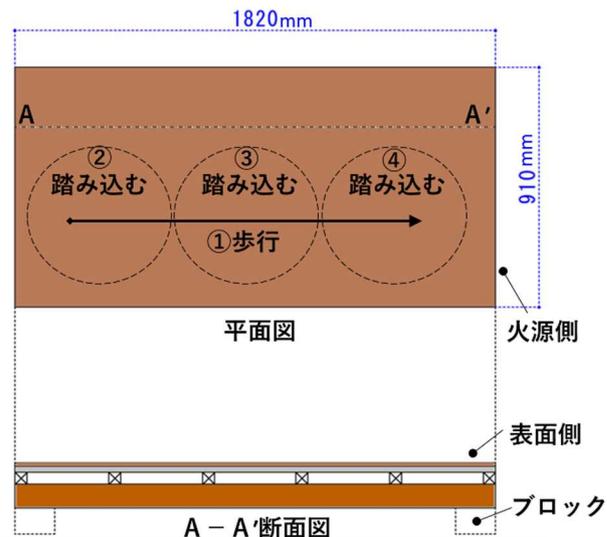


図 14 荷重試験の方法



図 13 焼損試験体の作成状況 (実験 DEF)

イ 荷重方法

荷重方法の概要を図 14 に示す。前アで作成した焼損試験体をブロック上に設置し、総重量 100kg に調整した実験係員が床表面上で歩行、踏み込みを行った。

(2) 実験結果

荷重試験の結果を図 15 に示す。床表面の最高温度が 167℃以上を示した実験 BCDEF の焼損試験体は、荷重により床材及び根太が損傷し踏み抜けた。一方、床表面温度 139℃を示した実験 A の焼損試験体は荷重により根太が損傷したものの、踏み抜けることはなかった。床表面の温度測定で高温を示した箇所は、床材や根太の損傷箇所と一致した。

焼損試験体	実験A 構造用合板なし	実験B 構造用合板なし	実験C 構造用合板なし	実験D 構造用合板 9mm	実験E 構造用合板 12mm	実験F 構造用合板 18mm
熱画像						
温度	139℃	167℃	178℃	199℃	178℃	169℃
踏み抜け試験の状況						
	・ 踏み抜けなし ④で踏み込むと根太が損傷するも床はたわむ程度	・ 踏み抜けあり ④で踏み込むと根太・床材が大きく損傷	・ 踏み抜けあり ④で踏み込むと根太・床材が大きく損傷	・ 踏み抜けあり ④で踏み込むと根太・床材が大きく損傷	・ 踏み抜けあり ④で踏み込むと根太・床材が部分的に損傷	・ 踏み抜けあり ④で踏み込むと根太・床材が部分的に損傷

図 15 荷重試験結果一覧

図 16 にフローリングの断面構成を示す。焼損試験体 BCDEF の踏み抜けた部分は、フローリングの MDF 部分 (厚さ 3 mm) のみ燃え残っていた。また、構造用合板の有無にかかわらず、燃え残った厚さは同程度であった。踏み抜けなかった焼損試験体 A は、フローリングの合板部分と MDF 部分を合わせた 6 mm が燃え残っていた。

全ての実験で、焼損が強かった箇所の周辺は、踏み込みによってわずかに沈み込むとともに、根太や床材裏面から軋む音が発生した。踏込んだ際に感じる床面が沈み込む感触は、床材や根太の焼損が激しく、燃え残った床材が薄いほど強くなり、燃え残った床材が厚いほど弱くなった。

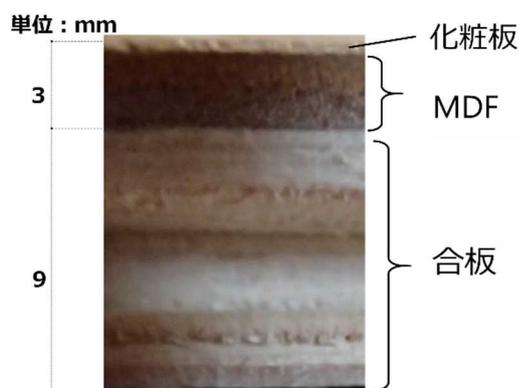


図 16 フローリングの断面構成

(3) 考察

今回の実験条件において、踏み抜けが発生する床表面の温度は約 140℃から約 160℃の間にあると考えられる。しかし、これらは踏み抜けが発生する温度であって、踏み抜け危険の察知に用いるには不十分である。そこで、各焼損試験体の踏み抜けが起きた部分の表面温度推移について確認した。その結果を図 17 に示す。

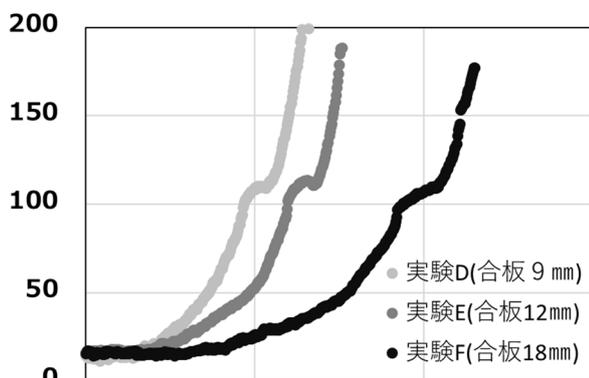


図 17 床材表面の温度推移 (実験 DEF)

図 17 より、床表面の温度推移は、加熱開始からしばらくは緩やかに上昇し、50℃付近から 100℃付近までは短時間

間で上昇していた。100℃付近では床材中の水分が気化する影響等で温度上昇が停滞するが、停滞解消後は燃焼を停止させた温度まで短時間で上昇していた。

このことから、床面温度が 100℃に到達した後、100℃以上となるまでの時間は短く、100℃以上の温度を指標とするのは問題がある。100℃以下の低い温度であっても木材の強度は低下すること、また、消防隊が退避する猶予も考慮すると、床表面の最高温度が 100℃となった時点を踏み抜け危険温度として捉え、意識することが妥当であると考えられる。

5 まとめ

(1) 階層間の延焼状況の察知について

床面を熱画像装置により撮影した場合、フローリングの床は床下の延焼拡大 (温度変化) を察知することができることがわかった。一方、床材が畳であった場合は、内部の延焼状況を判別することは困難であることがわかった。

また、天井を熱画像装置により撮影した場合、標準的な天井であれば天井裏の延焼拡大 (温度変化) を床面より明確に察知することができた。

床面及び天井面の熱画像では、根太又は野縁があたかも透けているかのように確認できることが、内部に熱源があり、その熱を熱画像で見ているということを示す現場での大きな根拠となると考えられる。

(2) 加熱による上階床面の脆弱化について

フローリングの床は、床材の厚さによらず、床表面の最高温度が 100℃となった時点を踏み抜け危険温度として捉え、意識することが妥当であると考えられる。

6 おわりに

本検証内容は、火災建物に屋内進入している個々の消防隊員にとって熱画像装置を使った階層間の延焼拡大を察知するための知見のひとつとして活用できると考える。

7 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。ここに厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 飯田ほか：放射温度計の活用方策に関する検証、消防技術安全所報、第 57 号、pp33-41、令和 2 年
- 住宅金融支援機構：フラット 35 住宅仕様実態調査報告 https://www.jhf.go.jp/about/research/tech_flat35_siyou.html、令和 4 年 2 月 24 日閲覧
- 平井ゆか、内田祥哉：畳と畳を支えるシステムの開発と普及についての文献に関する研究、住総研研究年報、No. 27、平成 12 年度

Verification of the Detectability of the Spread of Fire between Floors by a Thermal Imaging System

TABATA Yuuki*, KIDA Tetsuo**, YUASA Hiroaki***

Abstract

In this verification, we used a thermal imaging device to detect the spread of fire in the attic and on the ceiling under the second floor of a wooden house (“between floors”). Also, we experienced to see the temperature range probably causing the floor to fall away just after a step on it. The test was conducted by heating a tatami-sized test specimen which imitates “between floors” with a burner and photographing its surface with a thermal imaging camera.

The results showed that the wooden floor was more likely to detectably show the spread of fire under the floor. The device clearly detects the spread of fire in the attic when being used to the ceiling with standard specifications, compare to the floor. Eventually, we proposed an indicator specifying that a floor surface temperature of 100° C or higher, regardless of the thickness of the flooring material, might well cause the floor to fall away with one step.