

火災室内の温度と収容物の熱的変化の関係に関する検証

佐藤 歩*, 金子 公平*, 町井 雄一郎*

概 要

消防隊員の受傷火災等において、原因究明の前提として火災性状と受傷の関係を検討するために、火災室の熱環境について妥当と思われる仮定を行うことがある。本検証では、火災室内の熱環境を推定する手法を構築することを目的として、火災室内に存在する一般的な収容物の熱的変化を記録収集し、この情報を基にして火災シミュレーションで再現された火災室内の熱環境の妥当性を検討したものである。

検証は、一般的な収容物に対して対流による加熱を行った恒温槽実験と、小区画燃焼実験の熱環境を再現した火災シミュレーションで構成される。恒温槽実験では、加熱時間と加熱温度をマトリックス的に変化させた時のコンセント等の一般的な収容物の熱的変化の特徴を記録した。小区画燃焼実験で内部に設置した収容物の熱的変化の状況から推測した当該位置の最高温度を基にして、火災シミュレーションにより区画内の熱環境を再現した。

その結果、短時間における収容物の熱的変化は、加熱時間よりも加熱温度の方が支配的であることがわかった。また、火源からの放射の影響を受けない火災室隣室等の熱環境を再現できる可能性を示すことができた。

1 はじめに

東京消防庁では、消防隊員が受傷した火災等において、原因究明の前提として火災性状と受傷の関係を検討するために、火災室の熱環境について妥当と思われる仮定を行うことがある。火災現場での加熱条件と熱的変化の関係を示す痕跡は、木材の炭化深度による延焼状況の推定、壁面に付着した煤による煙層高さの推定等がある。しかし、写真1に示すように、火災現場では通常室内に設置される一般的なコンセントやスイッチ等（以下、「収容物」という。）の熱的変化のほうが特徴的な場合がある。

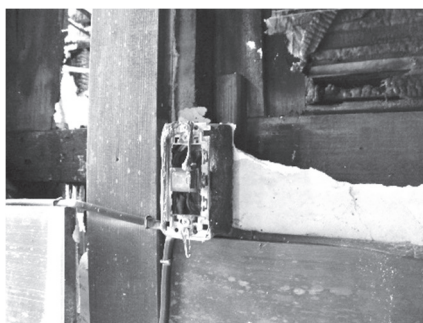


写真1 火災現場におけるスイッチの熱的変化の状況

本検証では、火災室内の熱環境を推定する手法を構築することを目的として、火災室内に存在する一般的な収容物の熱的変化の状況を記録収集し、この情報を基にして火災シミュレーションで再現された火災室内の熱環境の妥当性を検討した。

2 検証内容・方法

(1) 恒温槽実験の概要

想定熱源を火源からの対流として、加熱時間と加熱温度をマトリックス的に変化させた時の恒温槽内に設置された試験体の熱的変化を記録収集した。

ア 試験体

試験体として、一般的な収容物に多くみられる主に樹脂を材料とするものを選んだ。試験体の種類と数を表1に示す。各試験体の概要を図1に示す。

表1 試験体の種類と数

種類	数	種類	数
コンセント	5	電話機	1
コンセントテーブル	1	火災感知器	2
スイッチ	3	誘導灯	1
コンセントプラグ	3		

			
寸法：縦120×横70×厚さ23 (mm) 質量：74g 埋込型 A社製 コンセントA	寸法：縦120×横70×厚さ23 (mm) 質量：98g 埋込型 B社製 コンセントB	寸法：縦121×横71×厚さ23 (mm) 質量：80g 埋込型 C社製 コンセントC	寸法：縦121×横71×厚さ23 (mm) 質量：102g 埋込型 D社製 コンセントD
			
寸法：縦88×横48×厚さ26 (mm) 質量：89g 露出型 E社製 コンセントE	奥行124×幅42×高さ22 (mm) 質量：187g コンセントテーブル	寸法：縦120×横70×厚さ34 (mm) 質量：76g A社製 スイッチA	寸法：縦120×横92×厚さ34 (mm) 質量：130g A社製 スイッチB
			
寸法：縦120×横70×厚さ34 (mm) 質量：110g F社製 スイッチC	寸法：長さ51×幅28×厚さ16 (mm) 質量：20g G社製 コンセントプラグA	寸法：長さ61×幅30×厚さ16 (mm) 質量：25g G社製 コンセントプラグB	寸法：長さ81×幅28×厚さ15 (mm) 質量：27g G社製 コンセントプラグC
			
寸法：高さ72×幅161×奥行174 (mm) 質量：520g 電話機	寸法：100φ 26(mm) 質量：110g 自動火災報知設備用 火災感知器A	寸法：102φ 厚さ42(mm) 質量：85g 住宅用火災報知器 火災感知器B	寸法：幅148×高さ174×厚さ45 (mm) 質量：800g LED型 誘導灯

図1 試験体の概要

イ 恒温槽

恒温槽の概要を表2に示す。

表2 恒温槽の概要

方式	熱風循環方式
温度上昇率	10℃/分
内寸法	縦60cm×横50cm×奥行60cm
温度指示精度	±0.2℃

ウ 実験の方法

各試験体を恒温槽内に設置し、表3に示す加熱温度まで昇温させた後、定温状態で同表の加熱時間曝露した。試験回数は、条件ごとに1回とした。

表3 主な加熱条件

加熱時間	10分、20分、40分
加熱温度	100℃、150℃、200℃、250℃

試験体の設置状況を写真2に示す。試験体は、実際に設置される状態で実験が行えるように、天井面、壁面又は水平面に設定した。



写真2 試験体(コンセントA)の設置状況(壁面設置)

(2) 小区画燃焼実験の概要

単開口を有する耐火造約8畳の区画内に収容物を設け、クリブを燃焼させた小区画燃焼実験を行った。

ア 区画の構成、火源の条件等

区画の構成を図2、表4に示す。平面配置図を図3に示す。クリブの周囲に2枚の内壁を配置した。

表4 区画等の構成

床、壁、天井、内壁の材料	軽量気泡コンクリートパネル
区画の大きさ	幅3.6m×奥行4.0m×高さ2.0m
開口の大きさ	幅0.6m×高さ1.7m

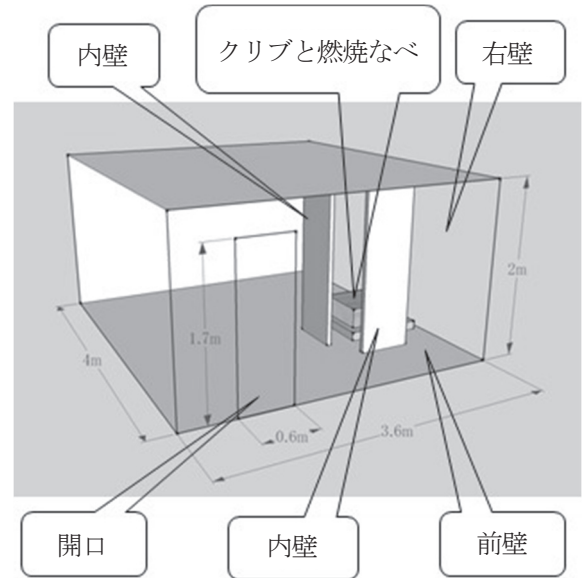


図2 区画の概要

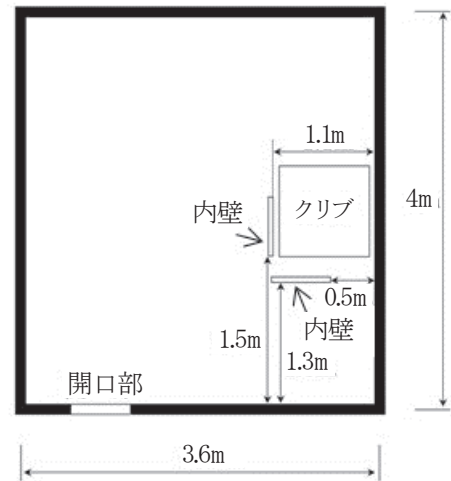


図3 平面配置図

区画内に燃料を入れた燃焼なべの上部にクリブ (A模型) ^{注)}を設置し、燃料に着火した。火源の設定条件を表5に示す。

表5 火源の設定条件

助燃材	ノルマルヘプタン 1ℓ
燃焼なべの大きさ	1.1m×1.1m
燃焼時間	10分
燃焼物	クリブ (A模型)

イ 収容物の設置位置及び種類

区画内に設置した収容物の種類と設置位置を表6及び図4に示す。また、①から③の各収容物の設置位置の温度をK型熱電対で測定した。

表6 収容物の種類と設置位置

種類	設置位置	
コンセントA	①	右壁内側高さ 1.7m
スイッチA	②	右壁内側高さ 1.0m
コンセントA	③	右壁内側高さ 0.3m
コンセントテーブル	④	前壁内側高さ 0m

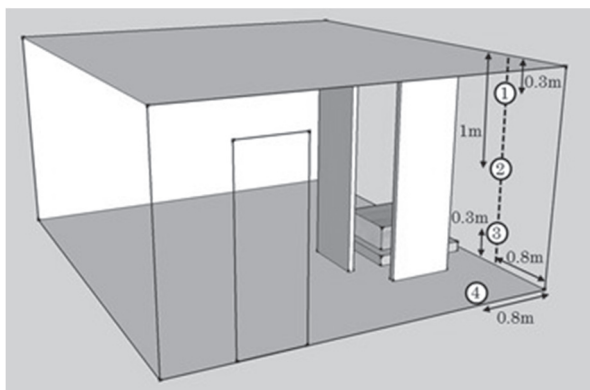


図4 収容物の設置位置

(3) 火災シミュレーションの概要

小区画燃焼実験の収容物の状態から区画内の最高温度を推定し（以下、「推定最高温度」という。）、この温度と火災シミュレーションで再現した小区画燃焼の収容物と同位置での最高温度（以下、「算出最高温度」という。）が合致するように、火災シミュレーションの火源条件を統計的手法による検定で最適化を行い、区画内の熱環境を再現した。

ア パソコンの概要、計算条件

使用したパソコンの概要を表7に、計算条件を表8に示す。

表7 パソコンの概要

プロセッサ	Intel (R) Xeon (R) CPU ES-2687W 3.1GHz
実装メモリ	64GB
システム種類	64ビット オペレーティングシステム

表8 計算条件

計算対象時間	600秒
格子サイズ	10cm
計算領域	幅 6.0m × 奥行 6.0m × 高さ 5.0m

イ 収容物の熱的変化による最高温度の推定手法

小区画燃焼実験で収容物の熱的変化から推測される温度をその位置の推定最高温度とした。温度の推測は、職員7名に恒温槽実験及び小区画燃焼実験の収容物の熱的変化の結果を比較してもらい、その主観的な評価から決定した。

ウ 火源条件の最適化

湯浅ら¹⁾による火源条件の最適化の方法を参考にして、各収容物の位置に対する1秒ごとの温度変化を得たところ、算出した温度の時間変動が大きかったため5秒間区間移動平均により近似し、その最高温度を火災シミュレーションで得た算出最高温度とした。

ユークリッド距離 E_n を(式)により求めた。火源発熱速度と火源の燃え広がり水平速度を変化させた時に E_n が最小値となる値を最適な火源条件とした。

$$E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^T (T_{p_i}^{\max} - t_{p_i}^{\max})^2 \dots \dots \dots} \text{ (式)}$$

P_i : 位置 i ($i=1, 2, 3$)

$T_{p_i}^{\max}$: 位置 P_i における測定温度 T_{p_i} の最高温度

$t_{p_i}^{\max}$: 位置 P_i における算出温度 t_{p_i} の最高温度

3 検証結果

(1) 恒温槽実験による一般的な収容物の熱的変化

コンセントAに対する加熱温度と加熱時間を変化させた時の熱的変化の特徴を図5に示す。

加熱温度が100℃の時、加熱時間を10分、20分または40分と変化させてもコンセントAの外観の上変化は少なかった。150℃の時、コンセントカバーは歪むが、加熱時間の変化の影響は少なかった。また、200℃の時も同様であった。250℃の時は、コンセントカバーは変色、溶融して気泡が発生し、加熱時間が長くなるほど溶融したコンセントカバーが本体から下へ垂れていた。しかし、本体から溶融し垂れた量の他、外観上の変化は少なかった。

以上から、埋設型コンセントの熱的変化は加熱時間よりも加熱温度の方が支配的であったことから、以後の恒温槽実験の加熱時間を主に20分とすることとした。

加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的変化について、コンセントBを図6に、コンセントCを図7に、コンセントDを図8にそれぞれ示す。埋設型コンセントの試験体間の傾向の違いは少なく、加熱温度が100℃の時、外観上の変化は少なかった。150℃になるとコンセントカバーは変形したが、メーカー名等が記載された刻印の判別は可能であった。200℃になるとコンセントカバーは重力に従って垂れ下がるように溶融し、刻印の判別は困難となった。さらに250℃になると変色し、気泡が発生した。

コンセントEについて、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的変化を図9に示す。加熱温度が100℃の時は外観上変化が少なく、150℃になると若干膨張した。200℃では全体的に亀裂を伴う歪みが現れ、250℃で全体的に変色した。

コンセントテーブルについて、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的変化を図10に示す。加熱温度が100℃の時若干の歪みが生じ、150℃では全体的に変形した。また、200℃になると変色し、250℃では変色が黒色に近い色合いになり、この時若干の白煙が発生した。

加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的変化に

ついて、スイッチAを図11、スイッチBを図12に、また、スイッチCを図13に示す。スイッチの試験体間の傾向の違いは少なかった。各スイッチは、加熱温度が100℃では外観上の変化が少ないが、150℃になるとスイッチカバーの刻印の判別が可能な程度の変形が現れ、200℃になるとスイッチカバーは熔融して垂れさがり、刻印の判別は困難となった。さらに250℃になると変色し、気泡が発生した。

加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化について、コンセントプラグA、コンセントプラグB及びコンセントプラグCを図14に示す。各コンセントプラグは、加熱温度が100℃の時、外観上の変化は少ないが、150℃ではコンセントプラグCのみ歪みが生じた。200℃になると全てのコンセントが変形し、250℃で変色した。この時、コンセントプラグCは全体的に熔融して垂れ下がり、黒色変化している箇所があった。

電話機について、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化を図15に示す。電話機は、加熱温度が100℃の時は外観上の変化は少なかった。150℃になると全体的に歪みが現れ、200℃でさらに変形が大きくなった。250℃では受話器と本体が一体化するほど熔融し、全体的に変色した。

天井面に取り付けた火災感知器Aについて、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化を図16に示す。加熱温度が100℃の時で外観上変化は少なかった。150℃になると熔融し、本体が垂れ下がるような状態となり、200℃で落下した。

壁面に取り付けた火災感知器Aについて、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化を図17に示す。天井面に取り付けた時と同様、加熱温度が100℃の時、外観上の変化は少なかった。150℃の時、重力方向に歪みが生じ、200℃の時に落下した。250℃の条件については200℃の時に試験体が落下してしまっただため、実施しなかった。

天井面に取り付けた火災感知器Bについて、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化を図18に示す。加熱温度が100℃では外観上変化が少なかった。150℃の時に全体が歪みはじめ、200℃の時に変色するとともに収縮した。

誘導灯について、加熱時間が20分、加熱温度を変化させた時の熱的变化を図19に示す。誘導灯は、加熱温度が100℃の時に外観上変化が少なかったが、150℃の時に表示板が重力方向に垂れるように変形した。200℃の時には表示板が脱落して本体が熔融し、垂れ下がった。250℃では本体内部の基板も脱落し、留め具のみが残る状態であった。

恒温槽実験の結果、収容物の熱的变化は加熱時間よりも加熱温度の方が支配的であったことから、熱的变化から加熱温度を推測することは可能であると考えられる。

	加熱温度			
	100℃	150℃	200℃	250℃
加熱時間 10分				
加熱時間 20分				
加熱時間 40分				

図5 恒温槽実験によるコンセントAの熱的变化

加熱温度 100℃	加熱温度 150℃	加熱温度 200℃	加熱温度 250℃

図6 恒温槽実験によるコンセントBの熱的变化

加熱温度 100℃	加熱温度 150℃	加熱温度 200℃	加熱温度 250℃

図7 恒温槽実験によるコンセントCの熱的变化



図8 恒温槽実験によるコンセントDの熱的变化



図13 恒温槽実験によるスイッチCの熱的变化



図9 恒温槽実験によるコンセントEの熱的变化

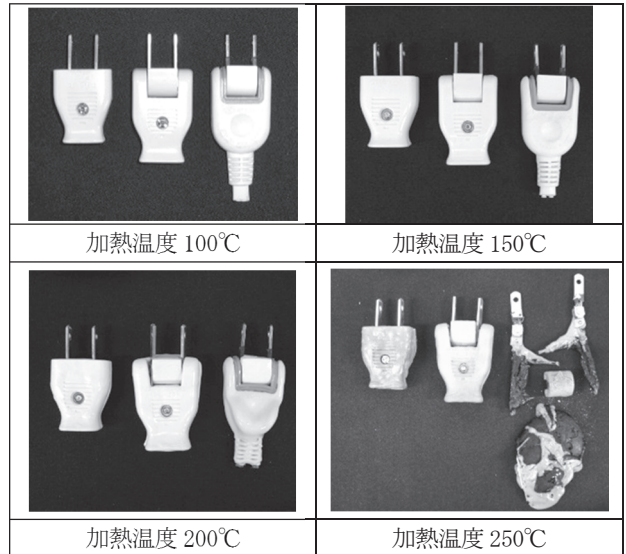


図14 恒温槽実験によるコンセントプラグA(左)、コンセントプラグB(中)、コンセントプラグC(右)の熱的变化



図10 恒温槽実験によるコンセントテーブルの熱的变化

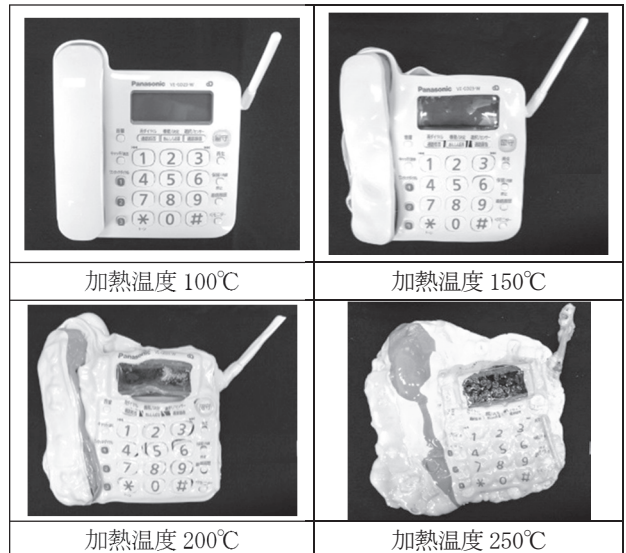


図15 恒温槽実験による電話機の熱的变化



図11 恒温槽実験によるスイッチAの熱的变化

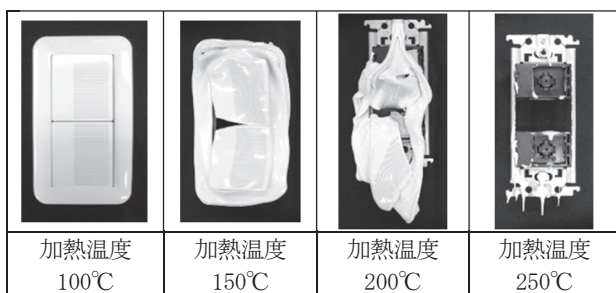


図12 恒温槽実験によるスイッチBの熱的变化

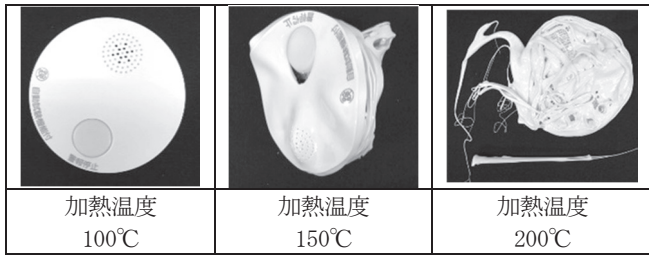


図 16 恒温槽実験による火災感知器 A の熱的变化
(天井設置)

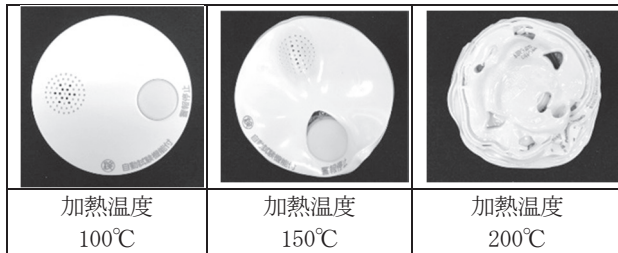


図 17 恒温槽実験による火災感知器 A の熱的变化
(壁面設置)

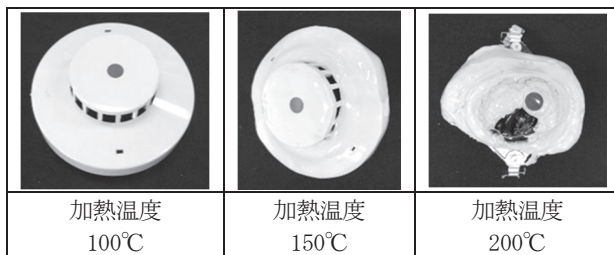


図 18 恒温槽実験による火災感知器 B の熱的变化

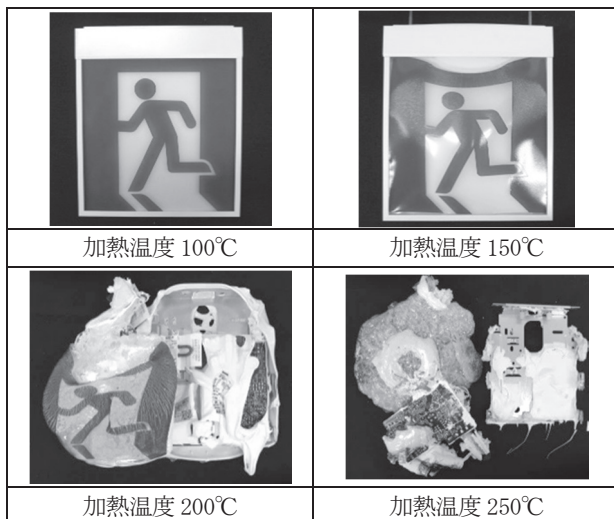


図 19 恒温槽実験による誘導灯の熱的变化

(2) 小区画燃焼実験による収容物の熱的变化

実験の状況を図 20 に示す。着火 1 分後には区画内に天井が視認できないほどの煙で中性帯を形成していた。着火 4 分頃に最盛期に達し、後に燃焼が収束していった。

小区画燃焼実験で区画内に設置した収容物の熱的变化を

図 21 に示す。右壁内側高さ 1.7m に設置したコンセント A はコンセントカバーがなくなり残存した部分も炭化していた。右壁内側高さ 1.0m に設置したスイッチ A はスイッチカバーが熔融しており、変色した。右壁内側高さ 0.3m に設置したコンセント A は、コンセントカバーがゆがんでいるが垂れるほど熔融しておらず、変色も少なかった。前壁内側高さ 0m に設置したコンセントテーブルは、本体の歪みが少しあったが変色は少なかった。

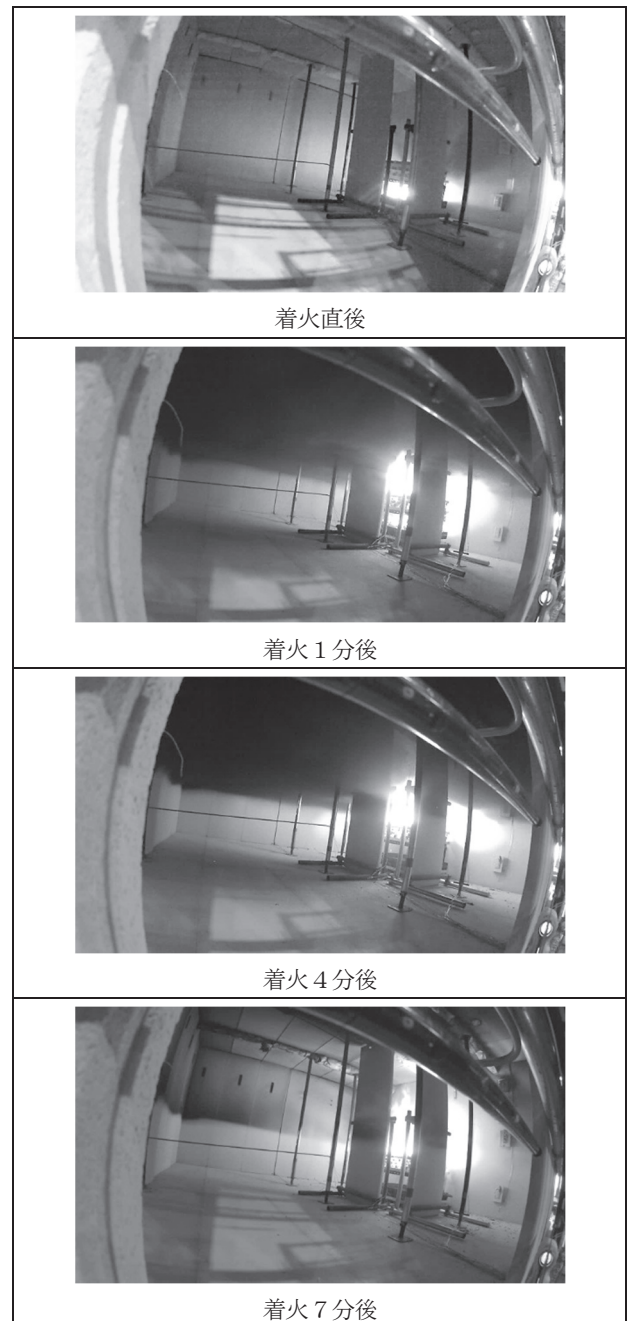


図 20 小区画燃焼実験の様子 (開口から内部を見た様子)

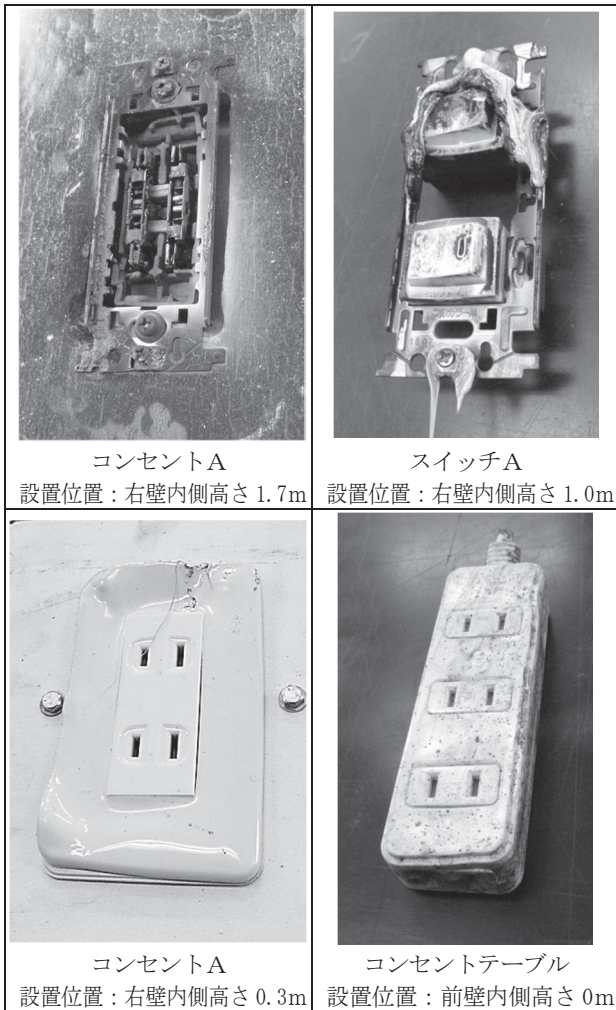


図 21 小区画燃焼実験における収容物の熱的变化

4 火災シミュレーションによる熱環境の再現性の考察

(1) 収容物の熱的变化から得た推定最高温度

小区画燃焼実験及び恒温槽実験の収容物の熱的变化を比較して、最高温度を推定した。前壁内側高さ 0m に設置したコンセントテーブルの加熱温度を推定すると、図 10 より 100℃ から 150℃ の範囲であることが判断できるが、それ以上細かい温度は本実験において指標がない。このため、7 名の職員による主観的な評価による推定を行った。各収容物に対するアンケートの回答値の分布とその平均値を図 22 に示す。各測定位置における回答値の平均値、標準偏差及び推定最高温度を表 9 に示す。この結果、大きなばらつきがなかったため、その平均値に近い 5℃ 刻みとした値を推定最高温度とした。また、右壁内側高さ 1.7m に設置したコンセント A は、加熱温度が 250℃ 以上の熱的变化があったと判断し、推定の対象外とした。

表 9 各測定位置における回答値の平均値、標準偏差及び推定最高温度

設置位置	右壁内側高さ 1.0m	右壁内側高さ 0.3m	前壁内側高さ 0m
収容物の種類	スイッチ A	コンセント A	コンセントテーブル
平均値	284.3℃	120.7℃	111.4℃
標準偏差	39.5	10.6	18.6
推定最高温度	285℃	120℃	110℃

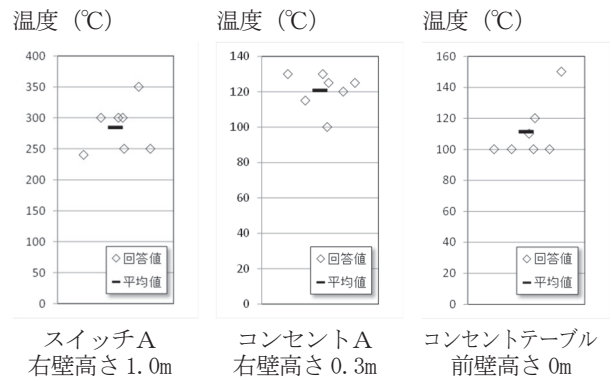


図 22 アンケートの回答値の分布とその平均値

(2) 火源条件の最適化

発熱速度を変化させてユークリッド距離 E_n を算出した。発熱速度が 440 kW/m² から 640 kW/m² までの間について、20 kW/m² 毎にユークリッド距離 E_n の計算を行った結果を図 23 に示す。図 23 から、発熱速度が 560 kW/m² であるときに、ユークリッド距離 E_n が最小値であり、その値を最適な発熱速度とした。

次に、火源の燃え上がり水平速度を変化させてユークリッド距離 E_n を算出した。火源の燃え上がり水平速度を 0.000m/sec から 0.090m/sec までの間について、0.009m/sec 毎に算出した。その結果を図 24 に示す。図 24 から、ユークリッド距離 E_n は凡そ 25℃ の値であり、大きな差がないことから、その最小値である 0.045m/sec が最適な火源の燃え上がり水平速度とした。

最適な火源条件（火源発熱速度、火源の燃え上がり水平速度）を用いて火災シミュレーションを行った。図 4 中の①、②、③における、火災シミュレーションの算出温度（以下、「算出温度」という。）と K 型熱電対の測定温度（以下、「測定温度」という。）の時刻変化を比較したグラフを図 25 に示す。

全体の傾向として測定温度は着火から 7 分経過したあたりから低下するのに対し、算出温度の温度低下は少なかった。また、右壁内側高さ 0.3m の最高温度について、測定温度は約 76℃、算出温度は約 185℃ で、差が大きかった。右壁内側高さ 1.7m 及び右壁内側高さ 1.0m の測定温度と算出温度は、着火 7 分あたりまでは大きな差はなかった。

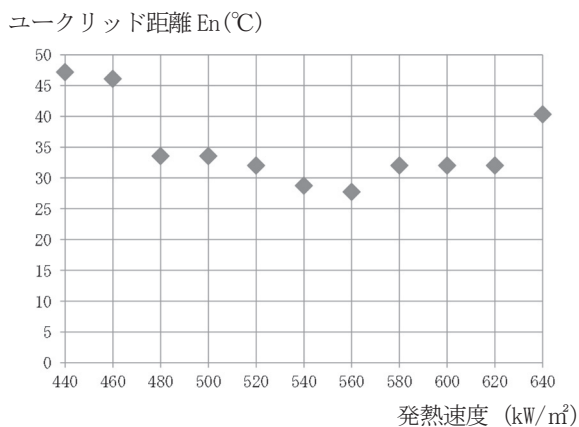


図 23 発熱速度 (440~640kW/m²) とユークリッド距離 En の関係

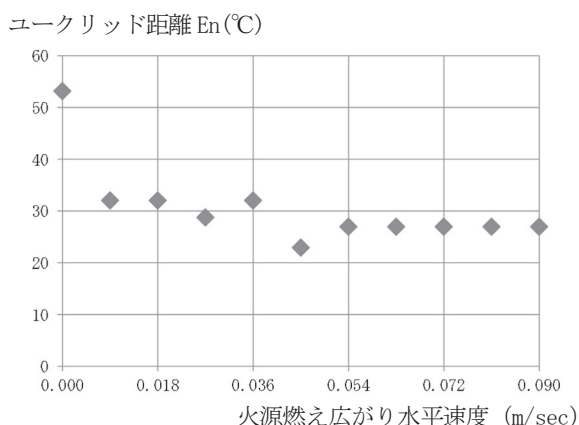


図 24 火源燃え広がり水平速度 (0.000~0.090m/sec) とユークリッド距離 En の関係

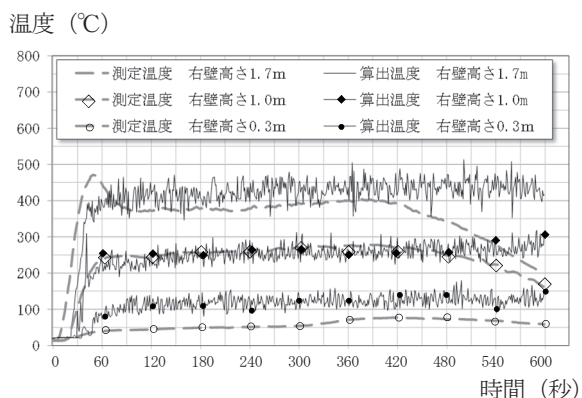


図 25 算出温度と測定温度の時刻変化の比較

(3) 火災室内の熱環境の妥当性の検討

図 25 において、測定温度と算出温度を比較して大きな差異があった「着火 7 分以降の温度差」及び「右壁内側高さ 0.3m の温度差」について検討する。

着火 7 分以降の温度差については、火源条件の最適化の計算過程において、湯浅ら¹⁾の方法では時刻歴の温度変化について、ユークリッド距離 En を算出したのに対し、本報では時刻歴のない算出最高温度を用いたことにより、いつ最高温度になったかの情報が計算過程で入っていないことが

原因と考えられる。小区画燃焼実験では、クリブの燃焼が着火 7 分以降から、火災最盛期から火災減衰期に移行し区画内の温度が低下したのに対し、火災シミュレーションの火源の発熱速度が終始一定の設定であったため、火源の減衰が考慮されなかったことによる。しかし、本検証結果を活用して火災シミュレーションによる消防活動時の受傷事故状況等を再現する場合、より危険側の計算結果となるため、支障ないものとして扱うこととした。

次に、各設置位置での推定最高温度と測定最高温度の比較を表 10 に示す。右壁内側高さ 1.0m の推定最高温度と測定最高温度の差は小さく、推定最高温度が妥当であったと考えられる。一方、右壁内側高さ 0.3m では、推定最高温度と測定最高温度の差が大きく、推定最高温度を高く評価していた。この原因は、設置位置が火源から近く、火源からの放射の影響を受け熱的変形が大きくなったためと考えられる。恒温槽実験では、火源からの対流のみを想定熱源としていたが、小区画燃焼実験では、右壁内側高さ 0.3m の位置が火源から近かったため、火源からの放射による熱的变化を受け、推定最高温度が大きく評価されたと考えられる。これらから、本報の手法は、火災室隣室のような、火源のまわりに可燃物がなく燃え広がりが少ない状態で、火源からの放射の影響を受けない熱環境に対して、再現できる可能性があると考えられる。

表 10 各設置位置の推定最高温度と測定最高温度の比較

設置位置	右壁内側高さ 1.0m	右壁内側高さ 0.3m
推定最高温度	約 285°C	約 120°C
測定最高温度	約 275°C	約 76°C

5 おわりに

本検証では、火災室内の熱環境を推定する手法を構築することを目的として、加熱条件を変化させた恒温槽実験において火災室内に存在する一般的な収容物の熱的变化を記録収集した。また、小区画燃焼実験において収容物（コンセント A、スイッチ A、コンセントテーブル）の熱的变化から各収容物が設置された付近の最高温度を主観的評価により推定し、それに合致するように火源条件を最適化した火災シミュレーションで小区画内の熱環境を再現した。さらに、算出温度と測定温度の時刻変化を比較することで区画の熱環境の再現時の妥当性を検討した。その結果、次のことがわかった。

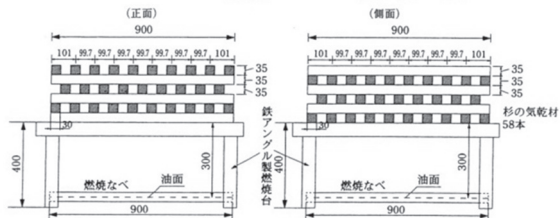
- (1) 恒温槽実験により、加熱時間と加熱温度を変化させたときの一般的な収容物の熱的变化の特徴がわかった。
- (2) 本検証における試験体の熱的变化は、加熱時間よりも加熱温度の方が支配的であることがわかった。
- (3) 本検証における試験体に対して、火源からの放射の影響を受けない範囲では、収容物の受熱温度を収容物の熱的变化の状況と恒温槽実験の結果と比較して推測することができた。

(4) 火災室隣室のような、火源からの放射の影響を受けない熱環境を再現できる可能性があることがわかった。

[参考文献]

1) 湯浅弘章ほか3名：定量的な再現性を有する火災シミュレーションの構築に関する検証（その2）（定量的な火災シミュレーション作成手法の検討），消防技術安全所報第52号，p.30，2015年

注) 下図に基づきクリブを設置した。



パッケージ型自動消火設備の設置及び維持に関する技術上の基準を定める件（平成16年5月31日消防庁告示第13号）第17（消火試験）の別図1の抜粋

Study on Compartment Combustion Temperatures and the Thermal Changes of the Objects in a Fire-Affected Room

Ayumu SATOU*, Kouhei KANEKO*, Yuuichirou MACHII*

Abstract

As an initial step of identifying the cause of firefighters' injuries, seemingly appropriate assumptions are made concerning a heat environment of a fire-affected room in order to investigate the relationship between fire characteristics and injuries.

In this study, with the aim of constructing a method to estimate the heat environment in a fire-affected room, the thermal changes of the objects inside a fire-affected room were recorded and collected, and the validity of the assumed heat environment inside a fire-affected room, which was calculated by the fire simulation based on the collected information, was investigated. Those objects are usually equipped in the room.

The study comprised a temperature-controlled room experiment in which the objects were heated by convection and a fire simulation that reproduced the thermal environment of a combustion experimented in a compartment.

In the thermal-controlled room experiment, the thermal change characteristics of the objects were recorded while the heating time and heating temperature were varied in a matrix manner.

In the compartment combustion experiment, the thermal environment within the compartment was simulated based on the maximum temperature of a certain position that is estimated from the thermal change in the objects within the compartment.

The study showed that the heating temperature has a greater impact than the heating time on the thermal change of the objects, and also presented a possibility that the thermal environments of the adjacent rooms, which do not receive the impact of the thermal radiation from the fire source, is reproducible.

*Equipment Safety Section