

実験と火災シミュレーションによる実火災体験型 訓練施設の熱環境可視化に関する検証

佐藤 歩*, 金子 公平*, 大滝 英一*, 町井 雄一郎*

概 要

東京消防庁には、消防活動訓練施設の一つに、改装したコンテナ内で木質パレットを燃焼させる実火災体験型訓練施設がある。実火災体験型訓練施設での訓練は、火災時の濃煙熱気の状態や火災性状を体験的に学べる一方、極めて過酷な熱環境下で実施されており、訓練中に隊員の個人装備品の損傷の恐れがある。また、訓練時、通常の個人装備品に加えて保護材を着装することにより、体感的に熱環境の推移を把握することが困難となっているため、安全に訓練を実施するためには、事前に施設内の熱気流の挙動等を正確に把握する必要があると考えられる。

本検証は、実火災体験型訓練施設の燃焼実験を火災シミュレーションで詳細に再現し、実験の測定温度と火災シミュレーションの計算温度を用いて、統計的検定にて火災シミュレーションの火源条件を最適化し、施設内の熱環境を可視化することにより、熱環境の特徴を把握するものである。その結果、施設内の熱環境の特徴の一つとして、垂直方向の温度分布が、高さ約1mを境にその上部で約150℃以上、下部で約40℃と大きく変化することがわかった。

1 はじめに

東京消防庁には、火災時の濃煙熱気の状態や火災性状を体験的に学ぶためにコンテナを改装した実火災体験型訓練施設（以下「当施設」という。）がある。当施設は、木質パレットを燃料として火災環境を再現しているため、熱気、濃煙や臭いが発生し、体験温度も給気と燃料量、放水により変えることができる。

しかし、当施設での訓練は、個人装備品や保護材の不完全な着装や熱環境を考慮しない行動をとった場合に、個人装備品の損傷の恐れがある。

2 目的

本検証は、当施設で安全かつ最適な訓練を実施するために、当施設の熱環境を測定し、その結果を基に火災シミュレーションで熱環境をアニメーションで可視化することにより、熱環境の特徴を把握する。

3 方法

(1) 熱環境測定

ア 当施設の概要

当施設は、40ftの移動式コンテナを改装したものであり、排煙処理装置や外部排煙排気室等が取り付けられている。出入りは外部排煙排気室を通過してからコンテナ内

部へ入る構造となっており、外部排煙排気室とコンテナ出入口付近の天井に排煙口が設けられている。また、それぞれの外部排煙口には垂れ壁と制御フラッパーが設けられている。コンテナ出入口から約10m奥へ進んだ位置に燃焼台が設けられており、ここで木質パレットを主とした可燃物を燃焼させることにより熱環境をつくっている。燃焼台の下には残渣を受けるための皿が敷けるようになっており、壁には残渣排出口が設けられている。

訓練実施時の熱環境は、当施設に常設されているデジタル表示温度計（以下「施設温度計」という。）により管理している。火源からの水平距離2.00mの位置の壁面の窪みに、床から0.23m（下段）、1.14m（中段）、2.00m（上段）の位置の計3か所にそれぞれ設置されており、センサー一部はパンチングメタルで保護されている。

当施設の構造を図1に示す。

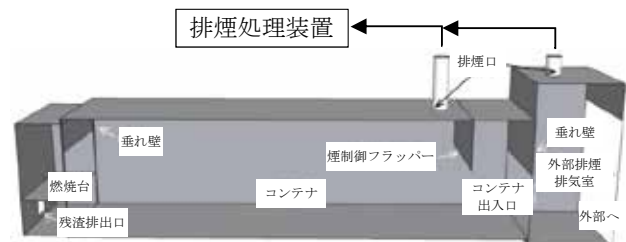


図1 当施設の構造

* 装備安全課

過去の実験から、施設温度計の値よりも訓練実施時の内部温度が高くなるのがわかっている¹⁾。このことを踏まえ、コンテナ出入口の扉を開放させた状態で行う訓練は、施設温度計（中段）が250℃程度となるように実施されている。

当施設の形状寸法を図2に、当施設の外観を図3に示す。

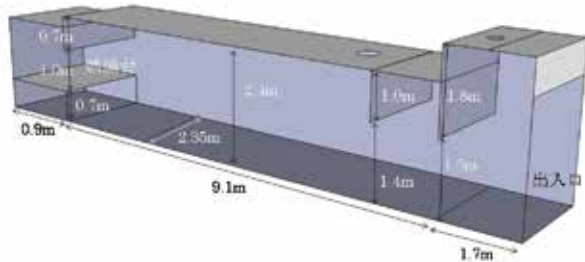


図2 当施設の形状寸法



図3 当施設の外観

イ 燃焼実験の概要

実験条件を表1に示す。

表1 実験条件

| | |
|----------------|-----------------------------|
| コンテナ出入口扉の開閉状況 | 開放 |
| 木質パレットの枚数（総重量） | 5枚 (94.9kg) 7枚 (133.6kg) |

なお、本報では、紙面の制約から基本的訓練設定である木質パレット5枚の結果を主に報告する。

木質パレット5枚と助燃材の設定状況を図4に示す。



図4 木質パレット5枚と助燃材の設定状況

ウ 測定内容

熱電対（K型）は、訓練者が火源に最も接近できる、火源からの水平距離2mの位置が密に測定できるように配置し、出入口方向に配置したものを合わせ、計17か所で測定した。熱流束計は、同じく火源からの水平距離2mの位置に、測定面を火源及び天井に向けて測定した。また、施設温度計の記録も行った。温度と熱流束の測定位置を図5に示す。

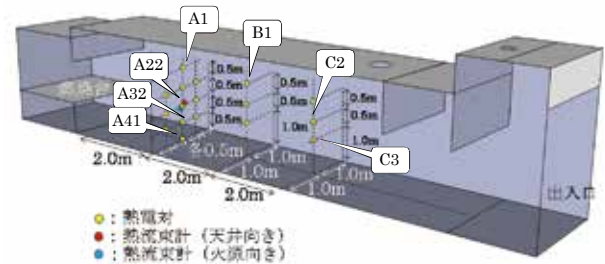


図5 熱電対及び熱流束計の測定位置

(2) 火災シミュレーション

使用したPC等の概要を表2に示す。

表2 使用したPC等の概要

| | |
|--------|--|
| プロセッサ | Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2687W 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 |
| 解析ソフト | Fire Dynamic Simulator Ver. 5.5.3 |

また、火災シミュレーションの設定値を表3に示す。

表3 火災シミュレーションの設定値

| | |
|--------|------------------------|
| 項目 | 設定値 |
| セルサイズ | 0.2m 角 |
| 計算領域 | x24.0m × y6.0m × z6.0m |
| セル数 | 108,000 |
| 開口部 | 大気開放 |
| 輻射輸送計算 | 有効 |
| 初期温度 | 20℃ |

火災シミュレーションに当施設の区画を入力し、火源条件ごとの計算温度を算出する。計算の対象時間は、実験中の熱環境の変化を捉えるため、火災初期から最盛期までの間とする。

湯浅ら²⁾による火源条件の最適化の方法を参考に、計17点の各測定位置の測定温度と火災シミュレーションの計算温度から、(式)を用いて得られるユークリッド距離Enについて、火源発熱速度と火源の水平燃え広がり速度を変化させた時に、ユークリッド距離Enが最小値となる値を最適化した火源条件とした。

$$En = \sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{t=0}^T (y_t - x_t)^2} \dots \text{(式)}$$

Pi: 位置 Pi (i=1, 2, 3, ..., 17)

y_t: 時刻 t の測定温度

x_t: 時刻 t の計算温度

(3) 熱環境の可視化

前(2)で決定した火源条件を基に火災シミュレーションで、当施設の熱環境をアニメーションで可視化する。

4 結果

(1) 熱環境測定

ア 温度測定結果 (木質パレット 5 枚)

主な測定位置の温度測定の結果を図 6 に示す。

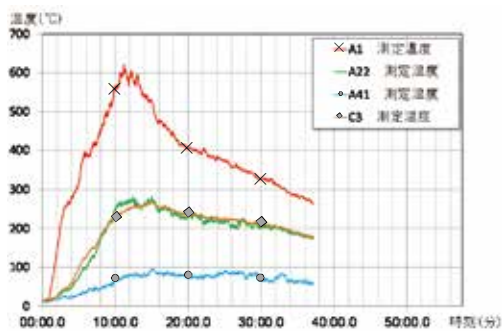


図 6 主な測定位置の温度測定の結果 (木質パレット 5 枚)

測定温度は、時刻約 11 分に最盛期に達し、その後約 4 分間継続した。その後、減衰期に至り、徐々に各測定温度は低下した。

火源からの水平距離が 2m で、測定高さが異なる A 1、A22、A41 を比較すると、最盛期の測定温度は A 1 で約 600°C、A22 で約 280°C、A41 で約 90°C であったことから、測定位置が高いほど、測定温度は高かった。

また、火源からの水平距離が異なり、測定高さが同じ A22 と C 3 を比較すると、最盛期の測定温度は A22 で約 280°C、C 3 は約 250°C であったことから、水平方向の測定温度に大きな違いはなかった。

イ 施設温度計の測定結果 (木質パレット 5 枚)

施設温度計の測定結果を図 7 に示す。

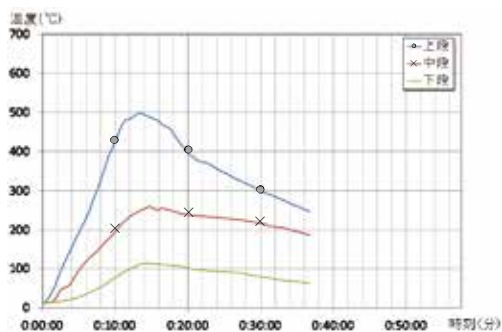


図 7 施設温度計の測定結果 (木質パレット 5 枚)

施設温度は、時刻約 12 分に最盛期を迎え、前アの測定温度と比較して施設温度 (上段) での最高温度は約 100°C 低くなったが、傾向に大きな違いはなかった。

最盛期の表示温度は、上段で約 500°C、中段で約 250°C、下段で約 100°C であった。

ウ 熱流束測定結果 (木質パレット 5 枚)

熱流束計の測定結果を図 8 に示す。

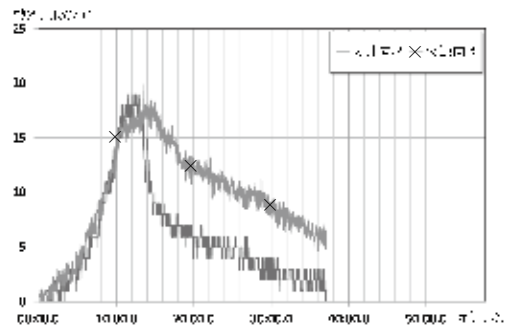


図 8 熱流束計の測定結果 (木質パレット 5 枚)

熱流束は、時刻約 10 分過ぎに最大値を示し、その後低下した。火源向きと天井向きの熱流束は、時刻約 10 分まで大きな差はなかった。

最盛期の熱流束は、天井向き及び火源向きはそれぞれ約 18kW/m² であった。

エ 木質パレットの枚数の影響

木質パレットが 5 枚と 7 枚の場合の、主な測定位置の測定温度の比較を図 9 に示す。

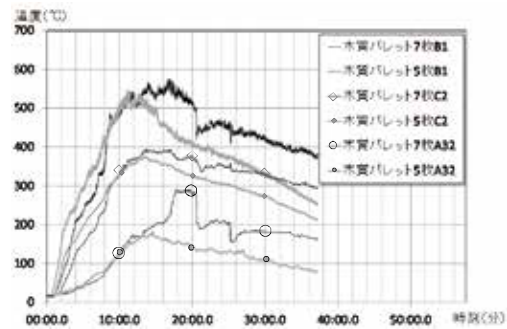


図 9 木質パレットの枚数の違いによる主な測定位置の温度測定の結果

木質パレットの枚数による比較をみると、時刻約 10 分までの火災初期は、時刻に対する温度上昇に大きな違いはなかった一方、時刻約 10 分以降の最盛期の継続時間は、木質パレット 7 枚の方が長かった。また、測定温度は測定位置 A32 のみが、時刻約 12 分以降、木質パレット 7 枚の方が高かった。

これは火災初期において、燃焼量に対して当施設内の酸素は多量にあり、燃焼速度は燃料である木質パレット

の燃焼速度に支配される、いわゆる燃料支配の状態だと推測され、最盛期になると、燃焼に伴い当施設内の酸素が減少し燃焼量は開口部から流入する空気量に依存する、いわゆる換気支配の状態だと推測されるため、測定位置B 1及びC 2で測定最高温度に差がなかったと考えられる。

また、木質パレットの枚数の違いによって、最盛期の継続時間に差が生じたことについて、木質パレット7枚の方は木質パレットが多くなったことによって燃料が増え、燃焼が継続したと考えた。それにより、測定位置A 32は高温帯が下がってきたため、測定最高温度に大きな差が生じたと考えられる。

(2) 火災シミュレーションの火源条件

ア 火源の発熱速度の決定

文献²⁾を参考に、火源の発熱速度を0 kW/m²から2,000kW/m²までユークリッド距離を算出した結果、図10のように発熱速度が910kW/m²の時、最小になったため、その値を発熱速度の最適値と判断した。

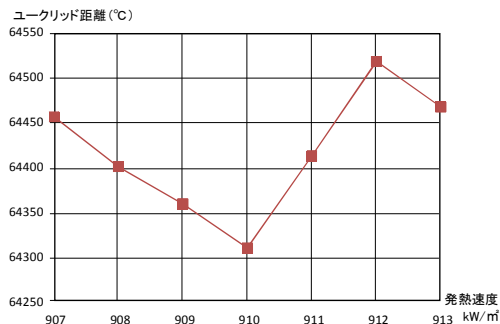


図10 発熱速度とユークリッド距離の関係

イ 火源の中心からの燃え広がり水平速度の決定

火源の中心からの燃え広がり水平速度を0 m/sから0.09m/sまでユークリッド距離を算出した結果、図11のように燃え広がり水平速度が0.00404m/sの時、最小になったため、その値を燃え広がり水平速度の最適値と判断した。

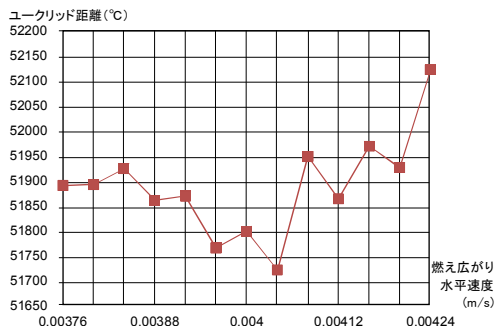


図11 燃え広がり水平速度とユークリッド距離の関係

ウ 温度計算の結果

温度計算の結果を図12に示す。

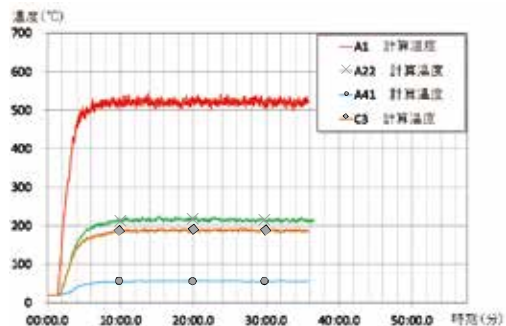


図12 温度計算の結果

火災シミュレーションによる温度計算の結果、時刻約10分過ぎに最盛期を迎えた。火源の発熱速度の減少を考慮していないため、その後、計算時間終了まで大きな温度変化がなく推移した。

火源からの水平距離が2mで、高さが異なるA 1、A 22、A 41を比較して、最盛期の計算温度はA 1で約510°C、A 22で約200°C、A 41で約60°Cであったことから、位置が高いほど、計算温度は高く、測定温度と同様の傾向であった。

また、火源からの水平距離が異なり、高さが同じA 22とC 3を比較して、最盛期の計算温度はA 22で約210°C、C 3で約190°Cであったことから、水平方向の計算温度に大きな違いはなく、測定温度と同様の傾向であった。

(3) 熱環境の可視化

木質パレットが5枚のときの当施設の長辺断面の熱環境の可視化の状況を図13から図16に示す。

火源から発生する熱気流は、時刻約3分に天井面に向かって広がっていき(図13)、時刻約4分30秒に天井面に達した後、天井面に沿って開口部に向かって水平に広がっていった(図14)。その後、熱気流は、時刻約8分に垂れ壁まで到達した後、垂れ壁を超えて、コンテナ出入口から外部排煙換気室へ流れていった(図15)。

図7より、時刻13分30秒に施設温度計(中段)は約250°Cなので、当施設での訓練が実施できる限界の状況と言える。高さ約1mの位置を境に、その上部で約150°C以上、下部で約40°Cとなっており、その境界で温度分布が2層に分かれている。つまり、高さ約1mの位置を境に下部が換気経路の上流側となって外気が流入し、上部が換気経路の下流側となって熱気流が流出する。火源からの水平距離が約7mの垂れ壁付近の位置までは、水平方向の温度分布の変化は少ない。また、垂れ壁付近の温度は、熱気流が垂れ壁に当たって一部滞留するので、他の位置と比較して高温となる。垂れ壁を超えて外部排煙排気室側へ向かう流れにより、垂れ壁直下は高温帯が低い位置まで下がっている(図16)。

なお、木質パレットが7枚のときも同様の傾向であった。

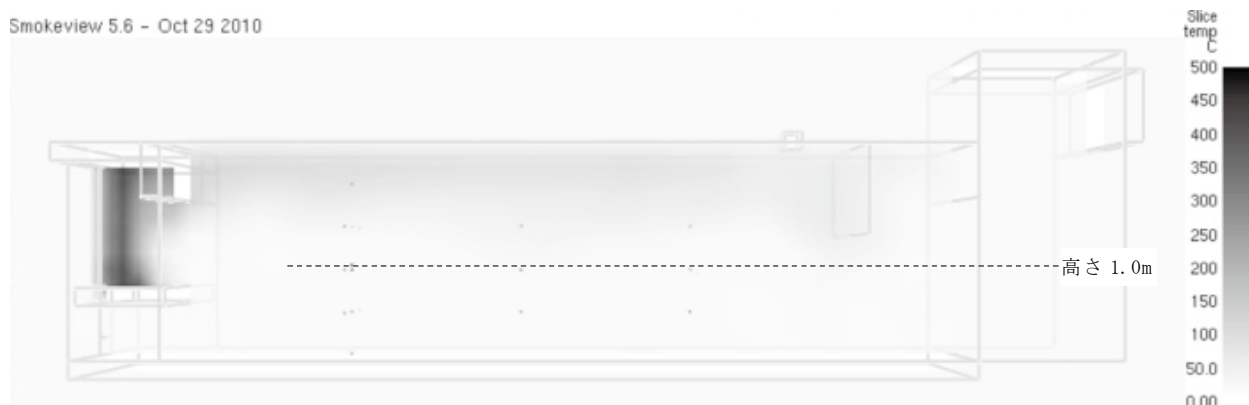


図 13 長辺断面の熱環境の可視化の状況（木質パレット5枚）（時刻約3分）



図 14 長辺断面の熱環境の可視化の状況（木質パレット5枚）（時刻約4分30秒）



図 15 長辺断面の熱環境の可視化の状況（木質パレット5枚）（時刻約8分）



図 16 長辺断面の熱環境の可視化の状況（木質パレット5枚）（時刻約13分30秒）

5 考察

温度分布の垂直方向の変化に着目し、受熱温度から個人装備品が損傷する可能性について考察を行う。

(1) 温度分布の垂直方向の変化

木質パレット5枚の条件について、時刻約13分30秒の火源から水平距離2mの短辺断面の熱環境の可視化及び主要な等温線の状況を図17から図19に示す。

250°Cの等温線は約1.25mの高さ(図17)、150°Cの等温線は約1mの高さ(図18)、100°Cの等温線は約0.9mから1mの高さだった(図19)。これらから、高さ約0.9mから1.5mにおいて、100°Cから250°Cの温度が分布しており、10cm単位で熱環境が大きく異なっている。

(2) 個人装備品の熱的变化

個人装備品と熱的变化の関係を表4に示す。過去の実験により明らかとなっているものについては、その値を引用する。これらより、個人装備品の熱的変形は、約100°Cから生じていると推定する。

(3) 個人装備品の損傷の推定

通常当施設で訓練する際には、防火帽を保護材で覆うため、表4のうち、帽体及びき章、受け台、防火帽隊名シールは露出しない。しかし、保護材の装着が不十分でこれらの部位が露出した場合は、折り膝姿勢(頭部1.0~1.2m)をしていても、帽体に変色するとともに、き章及び受け台が変形する恐れがある。また、高圧導気管保護カバーが露出した際には変形の恐れがある。

本検証結果により、当施設のみならず火災現場においても消防活動の原則の一つとして挙げられる、できるだけ姿勢を低く保つことが、個人装備品の損傷防止に重要であることを可視化により示すことができた。

6 おわりに

当施設での訓練は、実火災環境を模擬した濃煙熱気下で実施されており、訓練中に隊員の個人装備品が損傷する恐れがある。訓練時、通常の個人装備品に加えて、保護材を着装することにより、熱環境の推移を感じ取ることが困難となっているため、当施設内の熱環境の特徴を正確に把握する必要がある。

本検証は、当施設の燃焼実験を、火災シミュレーションで詳細に再現し、当施設の熱環境を可視化したものである。その結果、当施設の特徴は次の通りである。

- (1) 垂直方向の温度分布について、高さ約1mを境にその上部で約150°C以上、下部で約40°Cと大きく変化する。
- (2) 水平方向の温度分布について、変化は少ないが、垂れ壁付近では約250°C以上の高温帯が高さ約0.7mまで下がっている。

以上から、訓練中は低い姿勢を保つことを怠ったり、個人装備品が不完全な装着状態であると個人装備品の損傷につながる可能性がある。

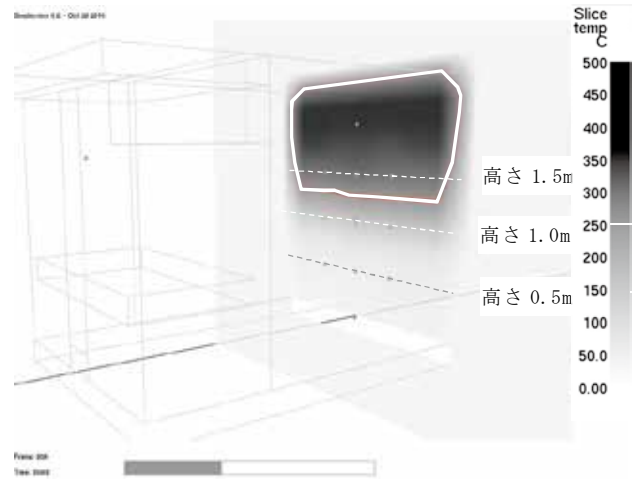


図17 短辺断面の熱環境の可視化及び等温線(250°C)の状況(時刻約13分30秒 施設温度計(中段)温度250°C)

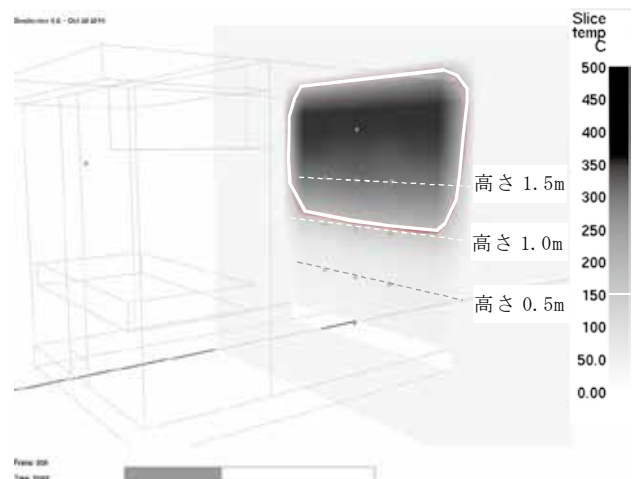


図18 短辺断面の熱環境の可視化及び等温線(150°C)の状況(時刻約13分30秒 施設温度計(中段)温度250°C)

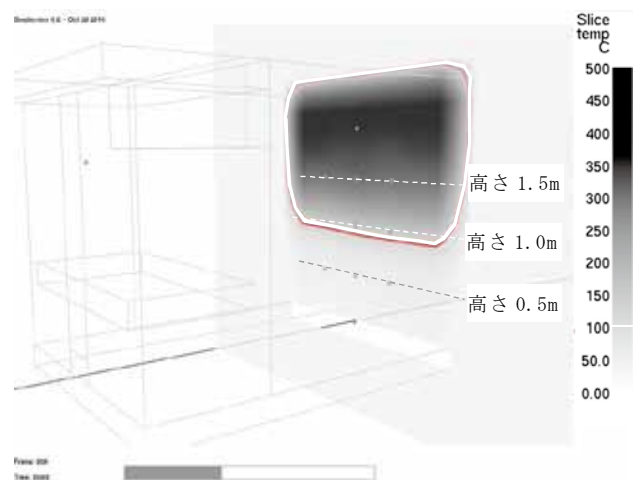


図19 短辺断面の熱環境の可視化及び等温線(100°C)の状況(時刻約13分30秒 施設温度計(中段)250°C)

表4 当施設の損傷が発生した個人装備品の名称、部位等

| 名称 | 部位名称 (材質) | 部位写真、熱的变化とその温度 |
|-----|------------------------------|---|
| 防火帽 | 帽体 (FRP 表面ウレタン塗装) |  溶融開始温度 375℃ 変色温度 48℃ ^{注1)} |
| | き章、受け台 (ABS 樹脂) |  変形温度 74~107℃ ^{注2)} |
| | 防火帽隊名シール (塩化ビニル) |  溶融開始温度 247℃ ^{注1)} |
| | 衝撃吸収ライナ (発泡スチロール) |  溶融開始温度 80~110℃ ^{注3)} |
| | 顔面保護版 (ポリカーボネイト、表面アクリル加工) |  変形温度 130℃ (ポリカーボネイト部分) 成形温度 170℃ (アクリルコーティング部分) ^{注2)} |

| | | |
|-------|---------------------------------|---|
| 面体 | アイピース (ポリカーボネイト、表面ポリシロキサン加工) |  変形温度 130~150℃ (ポリカーボネイト部分) 変形温度 200℃ (ポリシロキサン部分) ^{注2)} |
| 防火衣 | 反射テープ (塩化ビニル) |  溶融開始温度 190℃ ^{注3)} |
| 空気呼吸器 | 高圧導気管保護カバー |  変形温度 100~150℃ ^{注3)} |

注1) 作動型示差熱天秤 TG-DTA を用いて測定した結果

注2) メーカー公表値

注3) 恒温槽を用いて測定した結果

[参考文献]

- 1) 根本昌平ほか2名：実火災体験型訓練施設の熱環境の測定、消防技術安全所報 48号、pp. 45-50、2011年10月
- 2) 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 52号、pp. 26-39、2015年9月

Study on the Visualization of the Heat Environment in the Real Fire Training Facility by Means of Experiments and Fire Simulations

Ayumu SATOU*, Kouhei KANEKO*, Hidekazu OTAKI*, Yuuichirou MACHII*

Abstract

One of the Tokyo Fire Department's firefighting training facilities is the refurbished container in which wood pallets are burned to simulate actual fires. Drills with real fire make it possible to learn experientially about the conditions of thick smoke and hot air and the characteristics of fires.

These drills, however, are conducted in an extremely harsh thermal environment, and there are concerns about damage to fire personnel's personal gear. Moreover, the personnel wear protective materials along with standard individual gear during drills, making it difficult for them to sense changes in the thermal environment. To ensure that drills are conducted safely, we need an accurate understanding of the way thermal currents inside the facility behave.

This study reproduced the training facility's combustion experiments in detail using fire simulations. Utilizing the temperature measurements of those prior experiments and the temperature calculations from the fire simulations, the study optimized the fire source conditions through statistical tests and visualized the facility's interior thermal environment to provide an understanding of its characteristics. We discovered that one characteristic of the facility's interior thermal environments was the great changes in vertical temperature distribution—from 150°C or higher above a boundary line of about one meter in height to around 40°C below it.

*Equipment Safety Section