

## 火災時における避難リスクの認知向上を目指した屋内濃煙体験の提案\*

東北大学工学部・工学研究科技術部 渡邊 武

東北大学災害科学国際研究所 杉安和也

東北大学大学院・工学研究科 小林 光

### 1. はじめに

消防・防災訓練の一環として、煙体験ハウスと呼ばれる屋外テント内に安全性の高い疑似煙を充満させ、これを通り抜けることで、火災時の煙の怖さを疑似体験させるという取り組みが行われている（図1）。筆者らの所属する東北大学工学研究科においても、消防署より訓練機器（屋外テント及び煙発生装置（スモークマシン））と消耗品（スモーク液）を借用・購入し、毎年2回程度の濃煙体験訓練を実施している。しかしながら、この濃煙体験を行うには数ヶ月前に消防署へ事前予約を入れる必要があり、屋外実施であることから雨天時には中止せざるを得ないという運用上の課題があった。また、実際には屋内で火災に遭遇し、その煙から避難することが想定されるため、テント内での避難と火災建物からの避難とは状況が異なる。

この課題の解決策としては、天候の影響を受けない屋内で濃煙体験訓練を実施することが考えられる。テントの代わりに建物のオフィスや会議室などの一室を体験スペースとすれば、蛍光灯の照明や非常口標識、机や椅子などを用いた実際の部屋に近い環境を整え、より実践的な避難を提供できる。また、スモークマシン自体も事前に調達しておけば、消防署から物品を借用する必要も無くなり、訓練日程の調整も容易となる。

筆者らは、これらの利点から、屋外テントでは再現が困難であった体験内容を組み込んだ火災時における避難リスクの認知向上を目指す実践的な屋内の濃煙体験訓練プログラムを作成するべく、2017年10月から改良を加えながら計3回の屋内の濃煙体験訓練を実施した。本研究では、実施した訓練の内容について、アンケート結果を踏まえ、実施場所の選定、条件設定やその有用性等を検討した結果を報告する。



図1 屋外テントを用いた  
濃煙体験訓練

### 2. 屋内の濃煙体験訓練の概要

#### 2-1. 実施場所および参加者

濃煙体験を行う部屋は、排煙窓を有し、室内の自動火災報知設備が煙感知器ではなく熱感知器（作動式スポット型）である空室とし、訓練に使用する機器が要求する1φ200V電源設備のある部屋を選定した。この結果、第1回目（2017年10月12日）の実施場所は床面積60m<sup>2</sup>、高さ3mの部屋、第2回（2018年6月15日）および第3回（2018年10月16日）は第1回の

\* Proposal of dense smoking drill at indoor aimed for recognizing evacuation risks in case of fire  
by Takeshi Watanabe, Kazuya Sugiyasu and Hikaru Kobayashi

知見を踏まえ、短時間で煙が充満しやすいよう狭小な床面積 30m<sup>2</sup>、高さ 2.5～3m の部屋とした。なお、訓練時には非危険物のスモーク液を使用しているが、煙を火災と認識される恐れがあるため、事前に最寄りの消防署および警務員室へ連絡し、更に、体験部屋の熱感知器や廊下の煙感知器を誤作動しないようにカバーを施した。訓練参加者は、本学の留学生を含む学生、教職員、研究者のうち体験を希望する者とした。実際に参加した者の多くは実施場所（東北大学工学系総合研究棟）の入居者であり、20 歳代～60 歳代の男女計 73 名となった。

## 2-2. 使用機器

屋外の濃煙体験では、煙をあらかじめ充満させたテントに参加者が入場するが、本研究での屋内濃煙体験では、煙の充満過程を観察してもらうため、その再現機器としてスモークマシン（Rosco 1200：図 2）と熱風発生機（竹綱製作所 TSK-11）を併用し、各々にフレキシブルダクトを取り付けて火災時の高温の煙を再現した。スモーク液には、ほぼ無臭で滞留時間の長いクリアータイプ（ROSCO CLEAR-1）を使用した。また、煙を排出するための送風機（スイデン SFJ-300-1）、煙充満時の明るさを測定する照度計（Fuso TM-720）、更に誘導灯を模擬した PC 画面の輝度調整に輝度計（TOPCON BM-9）と波長測定に分光器（Flame-XR1-ES）、濃煙下での視認性確認のためにノートパソコン（TOUGHBOOK CF-C2）の液晶画面を非常口誘導灯再現の代用（図 3）とした。また室内には実際に家具も置き、疑似的なオフィス空間を再現した。このほか、距離を測定するためのスケールバーや誘導棒、体験結果を記入するアンケート用紙、スモークに対する保護具としてサージカルマスク、メガネ、軍手を用意した。



図 2 スモークマシンの煙

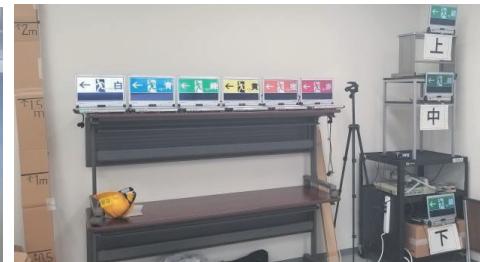


図 3 非常口誘導灯の模擬標識

## 2-3. 訓練内容

初回となる第 1 回目の屋内濃煙体験は、スモークマシン単体で濃煙を再現した。部屋の換気は行わず、約 10 分ごとに参加者十数人を体験終了者と入れ替わりで入室させた。参加者へは、入室前に濃煙下での避難方法とスモークマシンで発生させた煙について説明を行い、椅子や机のあるオフィスからの避難方法および蓄光標識の顕著性、水平・垂直距離の視認可能範囲を体験させた。第 2 回目は熱風発生機を追加し、煙と新鮮な空気が混ざる境目である中性帯の再現を試みた。また、第 1 回は煙を充満させるのに時間を要したため、部屋の広さが半分の体験部屋へ変更し、参加者 8 名を 1 班とし、約 15 分で班交代するようにした。さらに、濃煙下での視認状況をより実感させるため、パソコンを用いた 6 色（白、青、緑、黄、橙、赤）の非常口模擬標識、高さが異なる非常口模擬標識、床からの高さを示すスケールバーを追加し、3m 離れた場所から見え方を測定した（図 4）。この非常口標識の色の違いは、日本では緑色が使用され

ている一方、海外では赤色を採用している事例もあることから、非常時に本当に見えやすい配色サインはどれなのかを体験することを目的としている。非常口標識の設置高の違いも、現状では扉の上部、足元の2か所が主たる設置個所となるが、どの高さが濃煙下では認知しやすいのかを体験することが目的である。第1回同様に、最初に体験部屋の煙、避難方法を含めた体験内容を参加者へ説明し、体験後に体験結果に関する質問紙（アンケート）への記入を依頼した。なお、本体験は窓をスクリーンで覆い、蛍光灯を点けて行った。ただし、非常口模擬標識の視認性測定については、蛍光灯を点けた条件と点けない条件の2種類実施した。

第3回目は煙の濃度を体験者間で一定条件とするため、照度計を用いた管理を行った。また、パソコンによる非常口模擬標識の輝度も同様に統制し、実際に建屋に設置されている誘導灯と同じ輝度に合わせた。加えて参加者には健康障害防止のために保護メガネとサージカルマスクを着用させた。事前説明の後、参加者は室内が煙で充満する過程を観察し、照度計の値を目安にある程度煙が充満してから、非常口誘導灯を模擬したパソコン画面の見やすい高さと色、垂直方向・水平方向の視認可能距離を確認し、最後に姿勢を低くして壁に手を当てながら出口に向かって避難するという濃煙部屋からの避難行動を体験した（図5）。照明については自然光と蛍光灯の2グループに分けて実施した。さらに第2回同様に、参加者へ質問紙記入を依頼した。

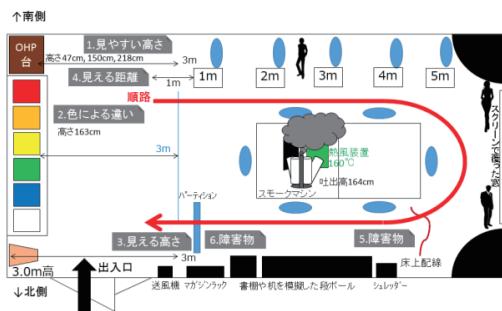


図4 濃煙体験部屋の平面図（第3回目）

	準備	入室前	入室後	煙放出	実験1 2	実験3 4	実験5	退室後
時間	7分	1分	2分	3分	2分	2分	1分	合計20分
主な内容	使用機器の動作確認 体験室内的換気	参加者がスモークマシンを着用	参加者の班分け	火災時の煙と中性帯の説明 火災報知器の説明	高さ違いの標識の見え方測定 火災時の煙と中性帯の説明	垂直方向の視認距離測定	水平方向の視認距離測定	棟中電灯や誘導棒を使用 室内からの避難訓練 保護具の返却 質問紙（アンケート）への記入

図5 体験内容と所要時間（第3回目）

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 訓練プログラムの検討

第1回目ではスモークマシンを単体で使用したが（図2）、煙が天井まで十分に届かなかつた。そのため、サーキュレーターで上方へ風を送り込むことを試みたが、結果的には部屋全体へ煙が拡散することとなった（図6）。また、床面積が $60m^2$ と大きかったため、図6の状態になるまで約8分の時間を要し、天井の煙が蛍光灯の光を乱反射して眩しさが増す（視認性が低下する）ことが分かった。さらに、参加者が入室する度に廊下へ煙が流出しており、廊下の煙感知器は何も対策していないと思われる。

第2回目は煙の温度と室温の差により、実際の火災に近い上昇気流を再現することを意図したスモークマシンと熱風発生機の併用で中性帯を作成することができた（図7は第3回目の訓練写真）。しかし、火災からの避難を考える上では、中性帯発生後の煙充満状態も体験させる必要があった。そのため、部屋をその都度換気する必要が生じ、排煙窓を開けて家庭用扇風機や

サーキュレーターで換気したところ約 15 分を要した。なお、照明の違いについては、蛍光灯 on より off の状態の方が非常口模擬標識は見やすかったという感想が複数寄せられた（図 8）。



図 6 体験部屋全体に煙が拡散（第 1 回目） 図 8 濃煙かつ照明 off での模擬標識の視認性



図 7 スモークマシンと熱風発生機を用いた中性帶の再現（第 3 回目）

第 3 回目は、アンケート結果（第 2 回）から煙の濃度で視認性が大きく異なることが判明したため、煙濃度の管理を行った。霧の濃度測定に照度計が使用される事例<sup>1)</sup>を参考に、床面の照度を測定した結果、肉眼の煙濃度と相関がある結果を得た（表 1）。また、色の差を体验させるパソコンの液晶の輝度を調整し（表 2），光の波長を測定した（図 9）。訓練の所要時間については、強力な送風機を用いたことで約半分の換気時間となり、事前説明から質問紙記入完了まで合計約 20 分で終わる内容となった（図 5）。

表 1 体験グループごとの体験内容別照度（単位 lux）

班	体験内容		
	BG	非常口模擬標識	垂直/水平距離
昼 1	420	250	150～100
昼 2	450	250	150～70
昼 3	400	250	180～150
夜 1	900	—	610
夜 2	900	700	450～340
夜 3	930	580	450～310
夜 4	890	570	390～280
夜 5	860	570	405～290

表 2 非常口模擬標識の色と輝度

主色	副色	輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	輝度差 (cd/m <sup>2</sup> )
白	黒	29	29
青	白	4.5	24.5
緑	白	6.5	22.5
黄	黒	23	23
橙	白	10	19
赤	白	6	23
誘導灯白	—	32	—
誘導棒 LED	—	62800	—

※輝度差は主色と副色の輝度の差

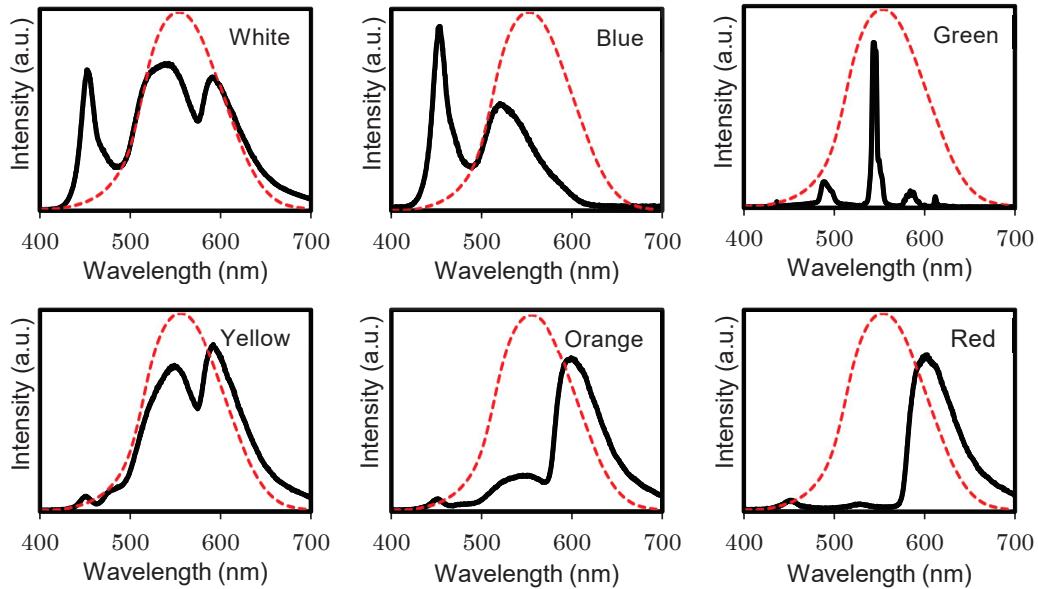


図9 非常口模擬標識の波長スペクトル（赤点線は明所視の標準比視感度）

第3回目の屋内濃煙体験訓練では、中性帯発生時は高さによって煙の濃度が異なることで低い姿勢で避難する理由を目で確認させ、充満後は視界が大きく奪われるため光源や音源が主な伝達手段になることを体験させた。参加者の感想には、「煙が天井に溜まることが分かった」、「低い姿勢で避難する理由がわかった」、「予想以上に見えないと分かった」など、濃煙下での状況を認知できた旨を示す回答が得られた。一方で、障害物を置いて避難させることで、参加者に避難経路を考えさせる目的もあったが、参加者からの反応は少なく（※2回目では「床のコードを整理する理由がわかった」等の回答有），訓練全体としては、視認性の変化への関心の方が高い結果となった。また今回は、色違いの非常口模擬標識を用いて行ったが、避難時には非常口等の標識が見えるかどうかが重要であるため、今後、標識を視認可能な間隔（本実験結果では水平距離2m前後）で配置し、濃煙体験部屋から避難させると、標識整備の大切さを強調できる可能性がある。

### 3-2. 視認性に関する体験結果

上記の体験結果の評価として、第2回の2条件下での参加者29名（男17、女12、平均33歳）、第3回の昼条件下での参加者24名（男17、女6、不明1、平均26歳）、夜条件下での参加者20名（男16、女4、平均40歳）のアンケート回答を集計した。この結果、非常口模擬標識の高さは「上」よりも「目線の高さ」や「下方」が、色は「緑色」や「黄色」、「白色」が視認しやすい結果となった（図10、図11）。また、ほぼ同じ煙濃度では、蛍光灯の照明が点くと標識が見えない人（不可視）が増加した。視認距離は誘導棒を使用していない「垂直方向」の方が誘導棒を点滅させた「水平方向」よりも短くなった。実際に、煙放出後約4分で天井高の半分まで煙が下降していた（図7右）。高さの違う非常口模擬標識の視認性は第2回目で中段、第3回目で下段が高くなつたが、第3回目は中性帯を分かりやすく見てもらうために中性帯が

目線くらいの高さで各種実験を始めたのに対し、第2回目は図6のように部屋全体に煙が充満した後に実験を開始していたため、煙の拡散程度で生じた差と考えられる。光の強さは光源からの距離の2乗に反比例するため、煙濃度が均一ならば目と距離が近い中段が視認しやすいのは予想と一致する。これにより、第2回のデータは第3回より濃い煙の状況での視認性を測定した結果と推測され、平均視認距離が短いこととも整合性がある。

次に、色については緑、白、黄が見やすい色となった。見やすさには、輝度差、明るさ（人間の感度）、形状、動きなどの要素があるが、今回の差は輝度差と人間の感度である。年齢による若干の感度差はあるものの、標準比視感度は555nmの黄緑色が最も感度が高く<sup>2)</sup>、図9でも緑や黄、白には555nm付近の波長が含まれており、見やすい色であったと考えられる。

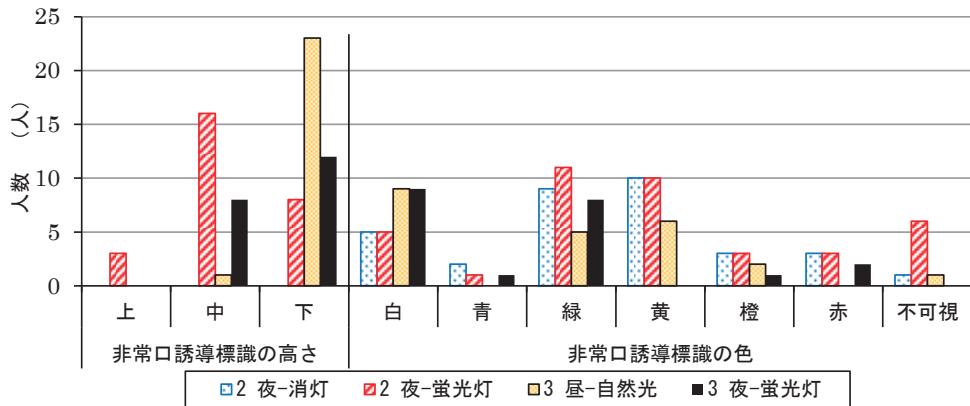


図10 屋内濃煙体験における視認性（高さ、色）に関する質問紙集計結果

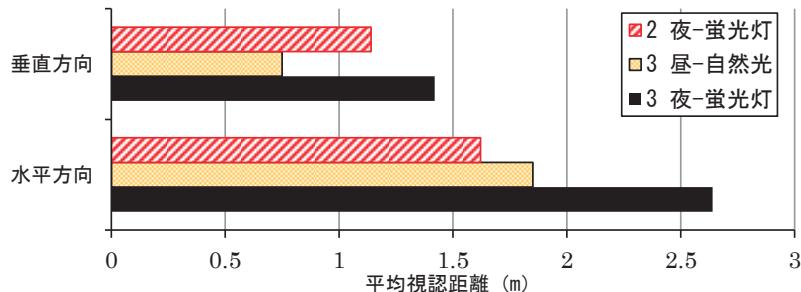


図11 屋内濃煙体験における視認距離（垂直および水平方向）に関する質問紙集計結果

#### 4. まとめ

屋内環境で火災初期-中期の煙状況を様々な道具を用いて疑似体験することは、運営面での利点と共に、初期避難の重要性と、中期避難の困難さを理解し、そのための事前準備の意義を認知させる上で一定の効果があると示唆できた。今後もより有効な訓練を検討していきたい。

#### 参考文献

- 1) 桑原祐貴、藤井慎、高松衛 他：濃霧中におけるLED色光の視認特性に関する研究－昼間および夜間における－、日本人間工学大会講演集、47, pp.314-315, 2011
- 2) 高橋康朗、佐川賢、岩澤洋：年代別の分光視感効率関数、照明学会誌、83, p.169, 1999