

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19510167  
 研究課題名（和文） 地下閉空間内火災時における避難者から見た視認性に関する実験およびシミュレーション  
 研究課題名（英文） Experiments and simulation on Visibility of Refugee at a Fire in underground enclosure  
 研究代表者  
 川端 信義（KAWABATA NOBUYOSHI）  
 金沢大学・機械工学系・教授  
 研究者番号：90126631

研究成果の概要：大型模型トンネル内に被験者が入り、避難環境に関するアンケート調査を行い、同条件時の煙濃度分布を計測し、避難者の心理と周囲の煙濃度および映像との定量的な比較を試みた。その結果、避難可能性は煙濃度だけで判断できず、避難者の心理・行動パターンと煙挙動との関連を考慮した避難環境の評価が必要とされることが明らかになった。次に、煙がない場合の実写映像を元に、実測した煙濃度を用いて煙が存在するとした CG 映像の作成を試みた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：火災防災

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：トンネル火災、避難環境、煙濃度、視認性

## 1. 研究開始当初の背景

道路トンネル内火災時における防災検討の手段は、経費がかかる実大火災実験がほとんど行われなかったこともあり、本研究開始年度（平成 19 年度）の数年前から実大実験からシミュレーションへと全面的に移行した状況であった。また、ヨーロッパの新しい道路トンネル防災基準 EUdirective が公表され、リスク解析の手法の積極的導入が加速したことから、日本国内でもリスク解析を取り入れて合理的な防災対策を講ずる試みもなされ始めていた状況であった。

トンネル防災の対策の基礎データとして避難者の避難可能限界煙濃度は極めて重要であるにもかかわらず、道路トンネル内火災時における煙濃度と避難者の行動に関しては公表されている資料は見当たらない。そのため、建築火災の分野において廊下状空間における避難実験結果から、Cs 濃度 0.4(1/m) を避難限界値とし、避難の可否の検討を行っていたが、建物廊下は道路トンネルに比べて空間容積が小さく、避難者の感覚も大きく異なると考えられ、適切な非常用避難設備の設置のためにも実際の道路トンネル空間での

避難可能限界煙濃度について明らかにすることが必要とされていた。

研究代表者の川端は、本研究の開始年度の平成19年度以前に、実大スケール比1/5の大型模型トンネルを製作し、トンネル火災時の煙の挙動について調べた。また、実際に模型トンネル内に被験者が入った実験も数例実施し、アンケート調査実験の予備実験を行った。

## 2. 研究の目的

トンネル火災に遭遇した被災者の避難の障害となる要因の1つに、煙による見通しの悪さがある。トンネル火災時には非常時換気運転によって、被災者の避難環境を前に述べた  $C_s$  煙濃度  $0.4(1/m)$  以下を維持し、安全な避難を可能にしている。本研究では、被験者が火災実験用の模型トンネル内に直接入り、火災実験中における避難可能性についてアンケート調査を行い、更にアンケート調査時の発熱速度、度分布、煙濃度分布について計測し、アンケート結果と煙濃度等の避難環境の関連について考察を行い、トンネル火災時における避難者の心理状況について検討することを第一の目的とする。

実際の火災実験をすることなく、火災時の避難者から見た視界をコンピュータ上で再現できたなら、火災実験をすることなく避難環境の評価が可能になり、特に閉空間における火災防災対策への寄与は大きい。本研究では、実験あるいはシミュレーションで得られた煙濃度分布を基にして、煙が無い場合の実写映像を加工し、人工的な火災時の避難者から見た状況を模擬した映像を得ることを第二の目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 実験装置概要

図1に模型トンネルの概要を示す。模型トンネルは縦対横の比が1:2となる矩形断面トンネル(長さ41 m、高さ1 m、幅2 m)である。実大トンネルに対して1/5スケールの模型トンネルとなるように、フルード数とレイノルズ数、そして壁面材料の熱伝達に関するピオ数を考慮して設計されている。フルード数と同時に流れのレイノルズ数を一致させるのは難しいので、十分な乱流域を保証するに留めた。図2に模型トンネル内部を示す。トンネル内の通常照明として、蛍光灯を1.5 m間隔でトンネル側面の  $Z = 0.95$  mの高さに左右合計26個設置した。更に、坑口側には被験者の視界を調べるために3個の誘導電球を  $Z = 0.3$  mの高さに設置し、火源側には非常口表示灯を設置した。

実験は縦流換気無しの状態を想定して行

った。このとき、火源に対して熱煙気流の流れは左右対称となることから、トンネルの火源側を壁面で閉じて対称条件を模擬した。火源の燃料と火皿面積を変えることにより、煙発生量を調節して、3ケースの実験を行った。燃料としてトルエン100%、火皿面積  $0.085 \text{ m}^2$  を Case-A、トルエン100%、火皿面積  $0.076 \text{ m}^2$  を Case-B、トルエン30%と *n*-ヘプタン70%の混合燃料、火皿面積  $0.085 \text{ m}^2$  を Case-C とした。煙発生量は case-A、case-B、case-C の順で小さくなる。



図1 模型トンネル概観



図2 模型トンネル内部

### 3.2 計測システム及び計測点

電子天秤を用いて燃料の質量減少速度を計測し、燃料の低位発熱量を乗じることで発熱速度を算出した。温度分布を計測するためにK型熱電対を、*Z*軸方向に0.2~0.9 mまで0.1 m間隔で8点、計160点、天井面には幅  $Y = -0.88, -0.63, -0.38, -0.13, 0, 0.13, 0.38, 0.64, 0.88$  mの9点、計206点設置した。煙濃度計は、長さ  $X = 12, 18, 24, 30$  mの4箇所、 $Z = 0.3$  から0.8 mまで0.1 m間隔で6点、計24点設置した。煙による減光係数  $C_s$  は

$$C_s = -\frac{1}{L} \ln \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

により計算される。ここで、 $I$ は受光光量、 $I_0$ は煙が無いときの受光光量、 $L$ は光路長(2 m)である。実大トンネルと模型トンネルの減光係数は、スケール比を  $\gamma = 5$  (実

大長さ/模型長さ) とすると、

$$Cs_r = \frac{Cs_m}{\gamma} \quad (2)$$

となる関係がある。また、発熱速度にはフルード数相似則から以下の関係式が成り立つ。

$$Q_r = \gamma^{2.5} Q_m \quad (3)$$

ただし、実大の添え字を  $r$ 、模型を  $m$  とした。

### 3.3 実験方法

アンケート調査は、被験者が防護服と防護マスクを装着して模型トンネル内の  $X = 21 \text{ m}$  地点に入り、火災実験中の状況を体験・観察し、避難可能性について回答する方式で行った。質問は実験中にリアルタイムで行い、4段階評価 (i: 可能、ii: どちらかといえば可能、iii: どちらかといえば不可能、iv: 不可能) で回答を得た。トンネル火災時には、被災者は少し前かがみになって避難すると考えられ、目線高さは  $1.5 \text{ m}$  と仮定した。これを模型スケールに変換し、被験者は目線高さを  $0.3 \text{ m}$  として、アンケートに回答した。

## 4. 研究成果

模型実験から得られた火災性状は実大スケールに変換し、実大トンネルでの状況を仮想して議論する。実大スケールに変換した平均発熱速度は、 $10 \text{ MW}$  (Case-A)、 $8.6 \text{ MW}$  (Case-B)、 $8.7 \text{ MW}$  (Case-C) となり、乗用車2台分程度の火災規模であった。

### 4.1 アンケート評価値の比較

アンケートでは、点火後、45秒①、120秒②、そして270秒③において、坑口側への避難可能性について調査した。また、点火後、60秒④、135秒⑤、そして285秒⑥において、火源側に設置されている非常口への避難可能性について調査した。調査結果から、式(4)を用いて避難可能性の評価値  $E$  を計算した。 $N_i \sim N_{iv}$  は4段階評価の  $i \sim iv$  を選んだ被験者の人数である。この評価値が50%よりも小さくなると、被験者集団の平均意見として、「どちらかといえば避難不可能」と判断したことになる。

$$E = \frac{N_i \times 3 + N_{ii} \times 2 + N_{iii} \times 1 + N_{iv} \times 0}{N_i + N_{ii} + N_{iii} + N_{iv}} \quad (4)$$

図3と図4に各実験ケースにおける評価値の時間変化を示す。一般的な傾向としては、点火後、トンネル内に煙が充満していくために、徐々に避難可能性の評価値は小さくなる。煙発生量から考えると、ケースCの評価値が常に最も高く、次にケースB、そしてケースAの順に低くなると予想できる。図3と図4によると、ケースCは予想通りであるが、ケースAとBを比較すると、

①②④⑤では、ケースAの避難可能性のほうが高くなった。これは、ケースBの被験者が30代から50代の一般人が中心であったのに対し、ケースAは体力に自信がある10代から20代前半の学生が中心であったため、心理的な余裕が現れたものと考えられる。また、坑口側への避難は、火源側に設置された非常口へ避難するのに比べて常に評価値は高い。

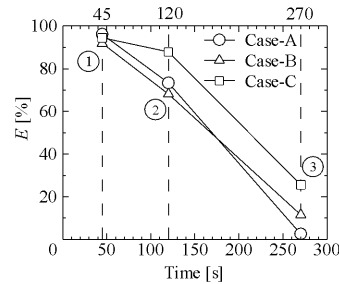


図3 坑口側

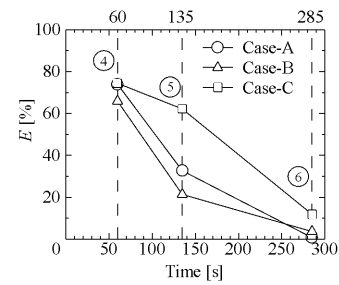


図4 火源側

### 4.2 アンケート評価値とトンネル環境の相関性

図5はケースAにおけるトンネル内温度と  $Cs$  濃度のコンタ図を示し、図6は坑口側と火源側を見た被験者の視界を示す。図5より、点火後45秒経過したとき、熱煙気流先端位置は被験者 ( $105 \text{ m}$  地点) の頭上近辺にあり、トンネル坑口側にはまだ到達していない。また、図6(a)に示すように、被験者から坑口側を見ると、天井部の照明も良く見えており、避難経路は確保されている。そのため、①は高い評価値を示す。点火後60秒経過後に火源側を見ると、非常口の高さにはまだ煙も熱気流も到達していないにもかかわらず、④の評価値は①に比べて幾分低くなる。火源側は炎が燃え盛り、熱煙気流の発生する様子が見えることから、心理的な圧迫感をもたらしているものと考えられる。実際の避難においては、火点から離れる方向に避難しようとする人の心理が見て取れる。図5より、点火後135秒経過後の熱煙気流先端位置は、ちょうどトンネル坑口側に到達したところである。このとき、坑口側、火源側どちらのケースも評価値は低下するが、特に火源側の評価値が激減し、50%を下回っている。このとき、被験者全体の平均意見として、「どちらかといえば避難不可能」と判断している。火源側

を見ると、図 6(b) に示すように、火源から発生する煙のために、非常口表示灯が見え難くなっている。しかし、図 5 に示す Cs 濃度分布では、まだ非常口表示灯付近の煙濃度はさほど高くはなく、危険性は小さい。火源側天井部には蛍光灯は取り付けられておらず、照明は非常口表示灯と火源の明かりのみであり、非常口表示灯が見え難くなったことが心理的な恐怖感を増長していると考えられる。図 5 より、点火後 285 秒経過後には熱煙気流は天井部を流れる間に冷却され、徐々に坑口側の床面まで降下してくる。そして、坑口側から火源側に流れる床面上の気流に乗って、煙がトンネル全体に拡散していく。この時、図 6 に示すように、坑口側の照明も火源側の非常口表示灯、さらに火源の炎さえも全く見えない。このような状態では、心理的な圧迫感が大変強くなる。その結果、このときの被験者周囲の煙濃度は、 $C_s = 0.2$  [1/m] 程度と基準値である  $C_s = 0.4$  [1/m] 以下であるにもかかわらず、図 3 と図 4 に示すように避難可能性の評価値は非常に低く、ほとんどの被験者は避難不可能と判断している。

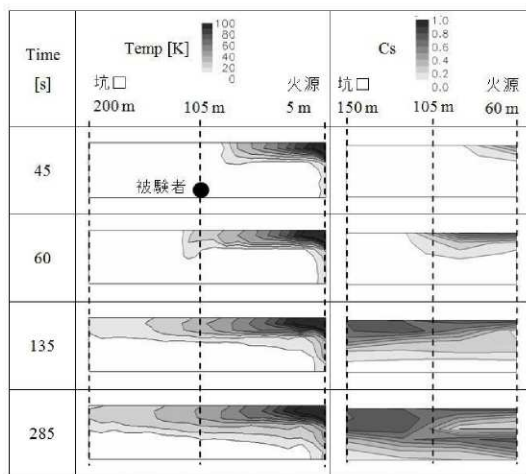


図 5 温度分布と Cs 濃度分布



図 6 被験者の視界状況

#### 4.3 避難者から見た視界を模擬する映像

避難者の周囲の視界は、まず照明装置の暗さによる。照明装置から発した光は煙で遮られ、さらに拡散することから、避難者に届く光は  $C_s$  濃度によって減衰することになる。避難者から離れた位置にある物体や壁は照明からの光を受け、その光の反射光が避難者に届くことになり、照明から物体に至る照明光の拡散と減衰、物体からの反射光が避難者までに至る間の拡散と減衰を考慮しなくてはならない(図 7)。図 8 にそのようにして得られた画像を示す。その状態に対応した模型トンネル実験による実写写真を図 9 に示す。なおこの時の煙濃度分布は実験結果を用いた。両者を比べると、天井部の照明近傍の光の拡散はよく似ているが、照明部がほとんど認識できないなど、課題は残されている。

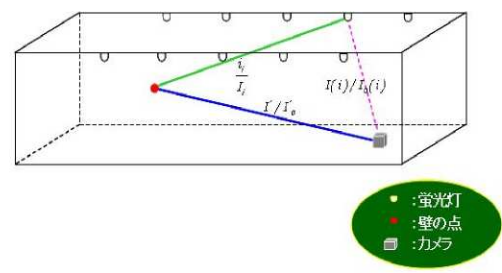


図 7 照明装置から発した光の軌跡

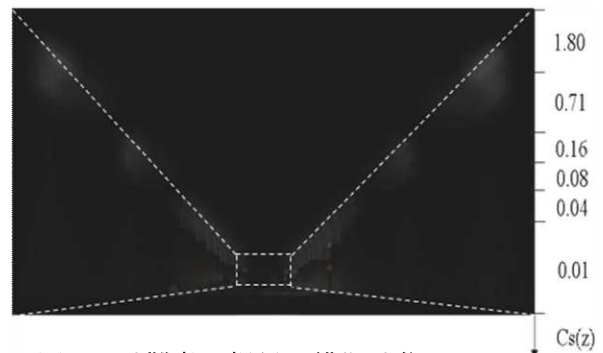


図 8 避難者の視界の模擬映像



図 9 模型実験による実写映像

#### 4.4 研究成果のまとめ

(1) 天井部の照明が良く見えている間は避難経路が確保されているため避難可能性の評価値は高い。しかし、トンネル内に煙が充満していくと徐々に評価値は低くなる。

(2) 20代の若者が被験者である場合、30代から50代の一般被験者と比べると、避難可能性の評価値は高くなる傾向がある。

(3) 避難経路の照明が良く見えない状況においては、被験者周囲の煙濃度が基準値  $C_s = 0.4 [1/m]$  以下でも、避難可能性の評価値は非常に低くなる。

(4) トンネル内照明位置および煙濃度による光の透過度および拡散を考慮して、煙があると想定した映像を取得したが、拡散が大きすぎ、実写映像よりも暗い画像となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

1. 武長瑛資郎, 川端信義, 田中太, 煙濃度と連立したトンネル火災避難シミュレーション, 平成19年度北陸信越支部第45期講演会(2008.3.8, 福井工大), 418

2. 須賀教好, 川端信義, 模型トンネルを用いたトンネル火災時の避難環境に関する実験, 2007年度日本機械学会年次大会講演論文集 Vol. 2(2007.9.9~12, 関西大), pp. 251~252.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

川端 信義 (KAWABATA NOBUYOSHI)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号: 90126631