

道路トンネル内の火災時における 避難行動に関する実験的検討

EVACUATION BEHAVIOR OF USERS DURING FIRE IN TUNNEL

石村 利明^{1*}・砂金 伸治²

Toshiaki ISHIMURA^{1*}, Nobuharu ISAGO²

Tunnel is a closed space, and there is great influence on the safety of tunnel users when the fire inside tunnel occurs. The degree of safety against fire has been examined with the concept of risk analysis in EU countries recently. The examination with quantitative evaluation methodology for tunnel safety is also discussed in Japan. This paper reports the result of experiments relating to the evacuation behavior of tunnel users such as starting time of evacuation and evacuation velocity when the smoke from tunnel fire occurs.

Key Words : road tunnel, fire, starting time of evacuation, evacuation velocity

1. はじめに

道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生した場合には利用者の安全面への影響が大きいと考えられる。2004 年に出された欧州指令¹⁾によれば、既設トンネルの安全対策について非常用施設等の有効性を検証するため、トンネルの安全度をリスクアナリシスによって実証されるものとしている。こうした中、国内においてもトンネルの安全度を定量的な評価手法に基づいて検討する試みが行われている²⁾。この評価手法を用いて安全度を検討していくうえでは利用者の避難行動に関する諸数値等が必要となり、これまで建築分野では避難に関する多くの検討が行われてきている³⁾。本報文では道路トンネルを対象として、トンネル内において火災によって煙が発生した状況を模擬した際の利用者の避難開始時間や避難速度などの避難行動について実験を行った結果について報告する。

2. トンネル利用者の避難行動に関する検討方法

検討は、写真-1 に示す実大トンネル実験施設（2 車線道路トンネル規模（延長 700m, 断面積 57m²））の約



写真-1 実大トンネル実験施設

400m 区間を用いて、火災時における避難行動（避難開始時間、避難速度）に関する 2 つの実験を実施した。

(1) 避難開始時間の検討

避難開始時間の検討に関する実験は、図-1 に示すよ

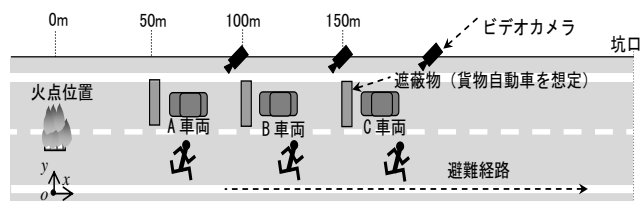


図-1 避難開始時間の実験概要図

キーワード：道路トンネル、火災、避難開始時間、避難速度

¹正会員 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所 Public Works Research Institute, (E-mail:ishimura@pwri.go.jp)

²正会員 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所 Public Works Research Institute

うにトンネル内に火皿を用いた模擬火災を発生させ、トンネル内の停止車両内にいる利用者が避難を開始し始める時間を計測した。火災は、ガソリンと同程度の発熱量を有するノルマルヘブタンを燃焼させるとともに、煙は発煙筒で模擬した（写真-2）。なお、実験時の条件は、火災が発生した後、火点位置の後続車が停止した状態と仮定し、停止車両内の利用者が避難を開始する時間をビデオカメラ等で計測した。車両の配置は、図中に示す乗用車3台（A～C車両）とした。また、トンネル内は無風状態で基本照明を全点灯の条件とした。被験者は、37名（男性35名、女性2名、年齢24歳～66歳（平均年齢41歳））として、各車両に1ケースあたり被験者約9名（3名/1台）で実施した。実験ケースは、火皿面積、避難物の有無（各車両の概ね4m前方に貨物自動車が停車して火災を直接視認できない状態を模擬：遮蔽物が有る場合は煙を覚知して避難となり、遮蔽物がない場合は火災を覚知して避難が開始されると仮定する）、避難促進の有無（1人の被験者、もしくは拡声放送によって早期避難を促す）等を変化させた表-1に示す5条件とした。火皿面積の大きさについては、本実験目的が火災発生時に利用者が煙や火災を覚知してから避難開始までの時間や、何をきっかけとして避難するかを把握することを目的としていることから、一般的な検討に用いられているトンネル火災規模に比較すると小さい火災規模の条件となる。なお、被験者には実験の主旨は伝えているが、

表-1 避難開始時間の実験ケース

ケースNO.	火皿面積(m ²)	燃焼時間(分)	発熱量(MW)	遮蔽物の有無	避難促進の有無	備考
1	1	10	2	有り	なし	煙を覚知
2	0.5	10	1	有り	なし	煙を覚知
3	1	10	2	有り	有り	煙を覚知、発災1分後に1人の被験者が避難促進
4	1	10	2	有り	有り	煙を覚知、発災1分後に拡声放送による避難促進
5	1	5	2	なし	なし	火災を覚知

着火のタイミング等を知らせずに車両内にとどまる状態で実験を開始した。実験時の状況を写真-3に示す。また、各ケース毎に被験者に対して実験時の状況や心理状況等についてのアンケート調査を実施した。

(2) 避難速度の検討

避難速度の検討に関する実験は、図-2に示すようにトンネル内を閉鎖した状態で、火災時の発煙状態を模擬

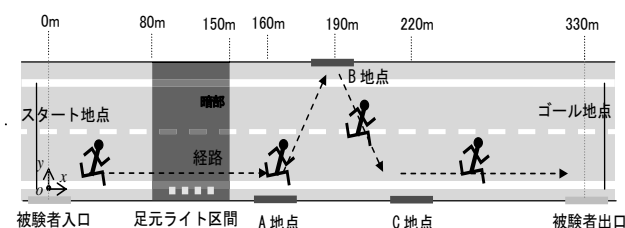


図-2 避難速度の実験概要図



写真-2 火皿による模擬火災の状況



写真-4 スモークマシンによる煙の発生状況



写真-3 避難開始実験時の状況



写真-5 避難速度実験時のトンネル内の状況

するためにスモークマシン（写真-4）を使用してトンネル内に煙を充満させた状態で、被験者にスタート地点からゴール地点までの予め設定した経路に従って避難した時の歩行速度を計測した。被験者は20名（男性17名、女性3名、年齢23～62歳（平均年齢42歳））として、被験者は煙濃度が異なる3条件について11～13名/1条件とした。また、同時に、スタート地点から約100m、150m、200m、250mの4箇所においてトンネル内の煙濃度（Cs濃度）の計測を実施した。実験時の状況を写真-5に示す。また、避難開始時間の実験と同様に、被験者に対して実験時の状況や心理状況等についてのアンケート調査を実施した。

3. 検討結果

(1) 避難開始時間に関する実験結果

図-3に各ケースにおける各車両位置までの煙の到達時間を示す。煙の到達時間は、火災によりトンネル上部空間に発生する熱気流で煙が流される先端の位置を観測員による目視確認で行った。これより、煙の到達時間は、各車両までの距離に応じて長くなっている。火災規模が他と比べて小さいケース2で煙の到達時間が若干長いも

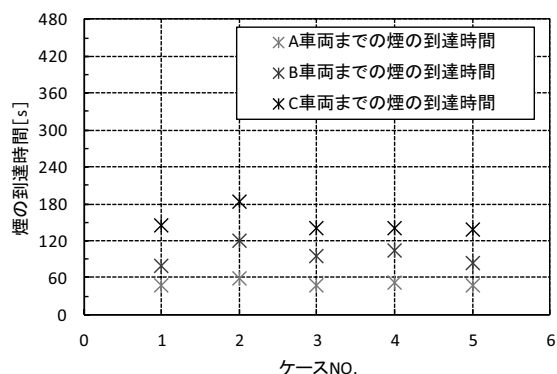


図-3 煙の到達時間

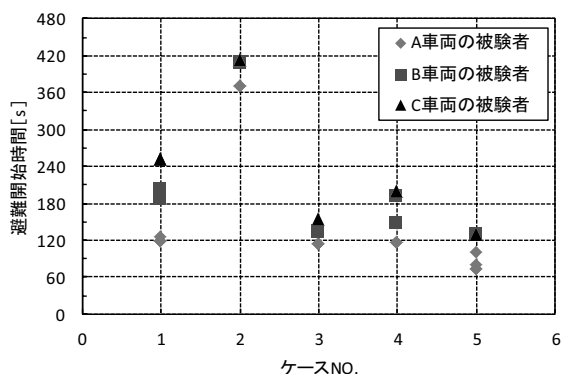


図-4 避難開始時間

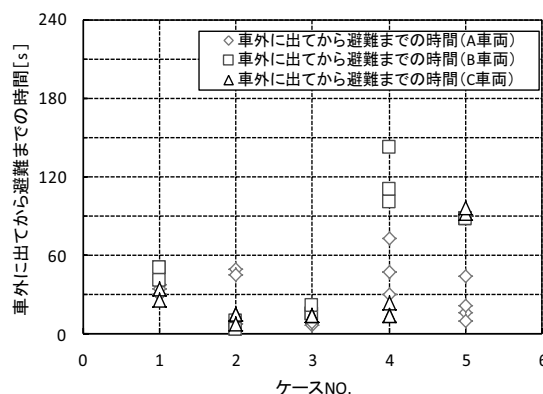


図-5 車外に出てからの避難開始時間

の、本実験で対象とした火災規模による煙の移動の顕著な差は見られない。

図-4に各ケースの避難開始時間を示す。車両毎の被験者の違いを見ると、各ケースともに火点に近いA車両が最も早く避難を開始し、B車両、C車両の被験者が続く傾向を示した。実験時の観察によれば、B車両、C車両の被験者は、それぞれ火点に近い車両の被験者が避難する行動を確認してから避難し始めていた。これより、避難開始時間は火点に近い利用者の避難行動が最も重要であると考えられる。以下の考察は火点に近いA車両の被験者を対象とする。煙覚知の場合の避難開始時間はケース2を除き概ね約120秒以内に避難を開始している。火災規模の異なるケース1と2を比較すると、避難開始時間が120秒から360秒程度と長い。これは火災規模が小さい場合は、煙は上部空間に存在するものの、下部空間まで降下するまでに時間を要し、車両内から煙の存在が確認しづらかったために避難開始時間が遅くなったと考えられる。一方、火災を直視できる火災覚知のケース5は、煙覚知のケースに比べて各車両の被験者の避難開始時間が早くなっている。これはトンネル内での車両停止の原因が火災であることを即座に認識できたことによると考えられる。また、避難促進を行ったケース3と4は、両ケースともにB車両、C車両の被験者に対して避難促進の効果が現れている。これは、トンネル内の状況、避難の必要性の情報等を早期かつ適確に伝達することで避難開始時間が早まる可能性があるものと考えられる。特に、ケース3の避難者による避難促進は、図-5に示したように車外に出てから避難開始するまでの時間が各車両ともに最も短く、火災の覚知から避難を開始するまでの判断に要する時間が極端に短い結果となっている。

次に、被験者に対して実施したアンケート結果について示す。図-6に2つの設問に対するアンケート結果を示す。これより、設問1の避難開始のきっかけは、「他の被験者が避難したから」、「煙が見えたから」の回答

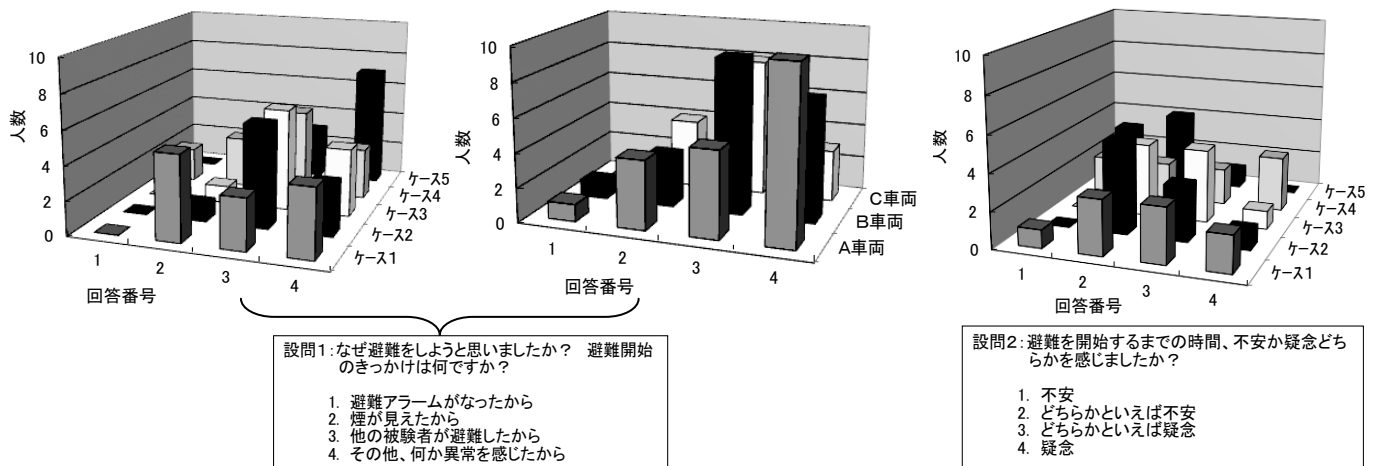


図-6 避難開始時間実験時のアンケート結果

数が比較的多く、それぞれ全体の約4割を占めていた。ケース5は火災を直視できることから「その他、何か異常を感じたから」が最も多かった。車両毎に整理した結果から、A車両で「その他、何か異常を感じたから」が最も多く、B車両、C車両で「他の被験者が避難したから」が多い結果であった。設問2の避難を開始するまでの時間の不安や疑念は、各被験者ともに感じていた。具体的な不安や疑念の内容を記述方式により回答を求めたところ、ほとんどの被験者がトンネル内に煙が発生していることによりトンネル内の前方で火災が発生していることを認識あるいは感じ取っていたものの、前方が見えないために状況が把握できないことによる不安感や周囲の車両の人の動きなどを気にしつつも、避難をするべきか、いつ避難をしたらよいのかなどを迷っていたことが分かった。これらの結果は、前述のとおり避難をするきっかけとして、他の被験者や拡声放送などによる避難促進することによって避難開始時間が早くなった結果と関連づけられると考えられる。したがって、避難促進を行うことが利用者の早期の避難開始に重要であることが確認さ

れた。

(2) 避難速度に関する実験結果

図-7に濃度の異なる3条件分の実験時におけるトンネル内の煙の濃度 (C_s 濃度) 分布を示す。これより、実験時に計測したトンネル内の C_s 濃度は、各地点ともに高さ方向は極端なばらつきはないものの、トンネル内の位置によってばらついていることがわかる。そこで、避難速度の整理にあたっては、トンネル縦断方向の各地点の通過時間をもとに分割した各区間毎の避難速度と近傍の C_s 濃度との関係を分析することとした。

C_s 濃度と避難速度の関係を図-8に示す。図より、避難速度は被験者による差はあるものの、一部の被験者を除いて概ね $1\text{m/s} \sim 2\text{m/s}$ 程度であった。本結果は、既往の文献^リで示されている避難速度である $0.8\text{m/s} \sim 1.2\text{m/s}$ と比較すると若干速い結果となった。これは、本実験用トンネルの構造（勾配がなく直線）が単純であり避難経路が比較的わかりやすかったことに加えて、実験の主旨や内容が事前に分かっていたことも影響してい

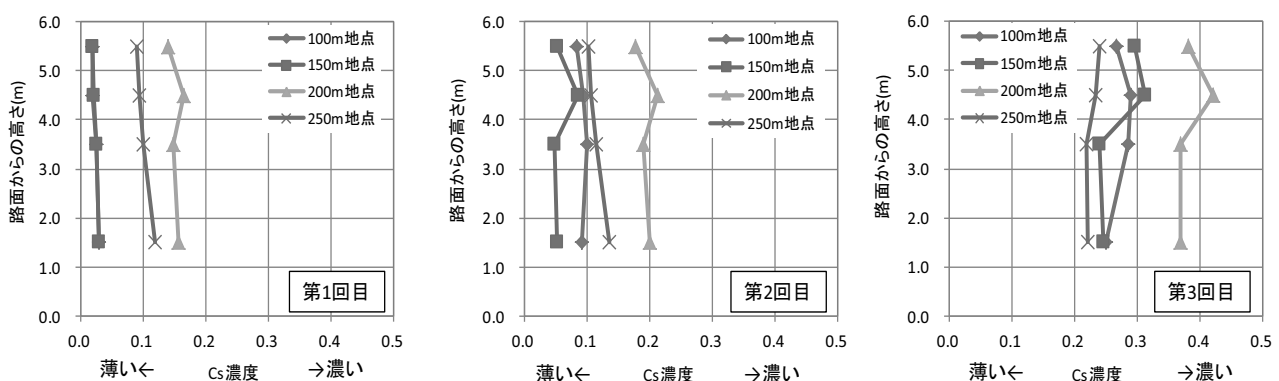


図-7 各地点における C_s 濃度分布

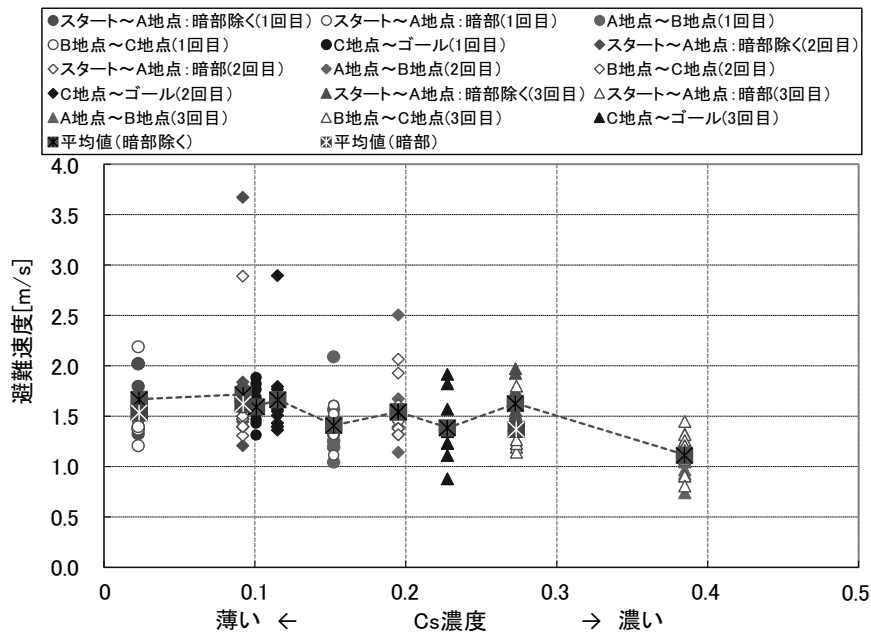


図-8 避難速度

ると考えられる。Cs 濃度と関係で見れば、Cs 濃度が概ね 0.3 程度までの避難速度の変化は見られず、Cs 濃度が 0.4 程度になると避難速度が若干低下する傾向にある。しかし、Cs 濃度が 0.4 程度でも約 1m/s の速度で避難が可能であることが分かった。また、スタートから A 地点での暗部と暗部以外の区間の避難速度の顕著な差が認められない。これは、暗部に足元ライトを配置したことによる避難方向の誘導効果が現れたものと考えられる。

次に、被験者に対して実施したアンケート結果について示す。図-9～図-11 に 6 つの設問に対するアンケート結果を示す。これより、設問 1、2 の歩きにくさについては、トンネル内の煙が薄い Cs 濃度が 0.2 以下の 1 回

目、2 回目では約 5 割程度が歩きにくさを感じないものの、煙が濃い Cs 濃度が 0.4 程度の 3 回目ではほとんどの被験者が歩きにくさを感じている。また、その要因は、「煙による見えにくさ」と「心理的な影響」の回答数が多い結果であった。

次に設問 3、4 の避難時の不安については、「どちらかといえばはい」以上の回答が多く、全体の被験者の 8 割程度で不安を感じていた。また、3 回目の煙濃度が濃い条件ではほぼ全員が不安を感じていたことがわかる。不安の種類は、「見えにくさによる不安」が最も多く全体の 5 割程度であった。また、3 回目では「避難できるのかという不安」が増加する結果であった。

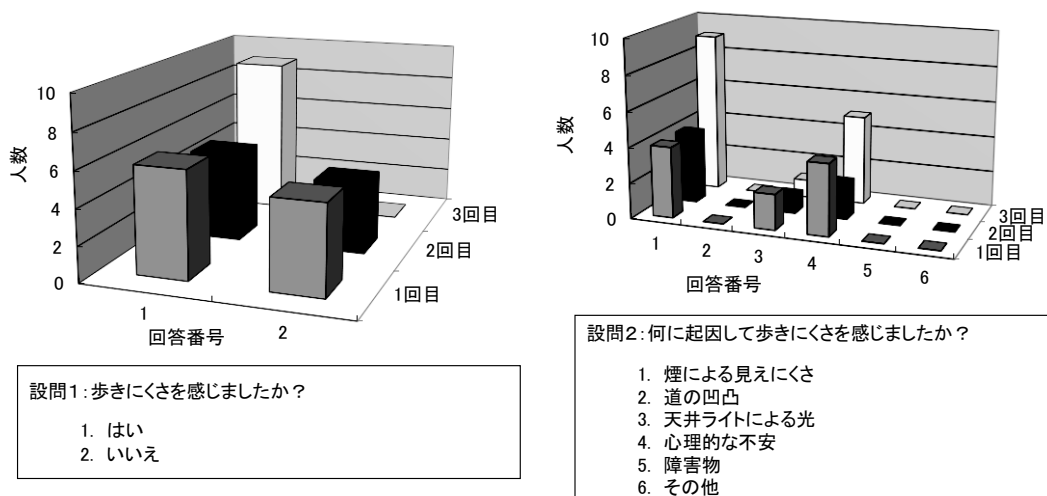
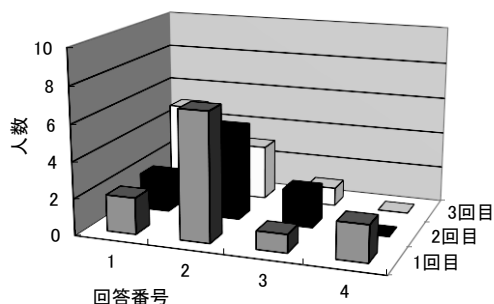
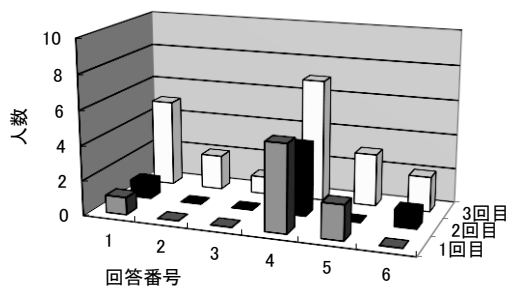


図-9 避難速度実験時のアンケート結果(歩きにくさ)



設問3: 避難している時不安に感じましたか？

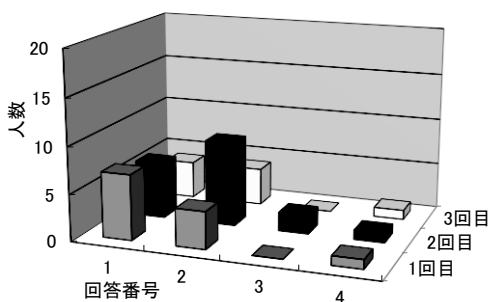
1. はい
2. どちらかといえばはい
3. どちらかといえばいいえ
4. いいえ



設問4: どういった不安を感じましたか？

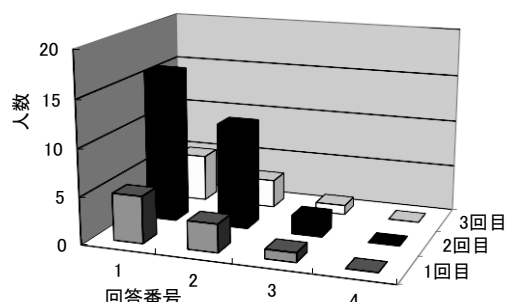
1. 避難できるのかという不安
2. 障害物に対する不安
3. 自分の安全を維持すること(自分の命)に対する不安
4. 見えにくさによる不安
5. 煙に対する不安
6. その他

図-10 避難速度実験時のアンケート結果(不安)



設問5: 煙の中、天井部の照明は役に立ちましたか？

1. はい
2. どちらかといえばはい
3. どちらかといえばいいえ
4. いいえ



設問6: 煙の中、足元ライトは役に立ちましたか？

1. はい
2. どちらかといえばはい
3. どちらかといえばいいえ
4. いいえ

図-11 避難速度実験時のアンケート結果 (天井部の照明、足元ライトの効果)

設問5,6の避難時に天井部の照明、足元ライトが役に立ったかどうかについては、足元ライトを含めて両照明ともに「どちらかといえばはい」以上の回答が多く、全体の被験者の9割程度で役に立ったとしており、避難時の照明の確保は有効であることが再確認された。

4. まとめと今後の課題

本検討により火災時における利用者の避難行動（避難開始時間・避難速度）の概略的な傾向が把握できたものの、実験の条件が限定されており全てのトンネルに対する普遍的な傾向であるとは言えない可能性もある。今

後、さらに種々の条件下における検討を行い、利用者の避難行動について定量的な評価を行っていくとともに、利用者の早期避難を促す方法や足元ライト等による誘導効果について検討することが重要と考える。

参考文献

- 1) DIRECTIVE 2004/54/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network
- 2) 砂金伸治, 角湯克典, 真下英人: トンネル安全度評価のためのリスクアセスメントに関する一考察, 土木学会地下空間研究委員会, 地下空間シンポジウム論文・報告集第17巻, 2012.
- 3) 新・排煙設備技術指針 1987年版, (財)日本建築センター, 1987.