

Study on the potential risks analysis approach for tunnel fires in expressway tunnels

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45404

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

高速道路トンネルの潜在的火災リスク評価手法の研究

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

学 籍 番 号 1323122010

氏 名 山崎哲也

主任指導教員 川端信義

提 出 年 月 2016年1月

目 次

第 1 章 序論	
1.1 研究の背景	2
1.2 高速道路トンネルの現状	6
1.3 研究の目的	8
第 2 章 高速道路トンネルの統計的火災リスク評価	
2.1 研究の枠組み	10
2.2 トンネル火災事故と被害状況の統計	11
2.3 統計的火災リスク評価	18
第 3 章 高速道路トンネルの潜在的火災リスク評価	
3.1 潜在的火災リスク評価	40
3.2 リスク削減効果	47
3.3 リスク管理手法	52
3.4 得られた知見	56
第 4 章 潜在的リスクの効果的な削減策の検討	
4.1 トンネル火災の認識	58
4.2 近年のトンネル火災事故事例の分析	59
4.3 啓発活動の課題	69
4.4 効果的な啓発	71
4.5 新たな取り組み	73
4.6 非常口の強調	74
4.7 煙の中での避難	78
第 5 章 結論	
5.1 本研究のまとめ	82
5.2 今後の課題と展望	84
参考文献	85
謝辞	87

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

道路トンネルは閉鎖された空間のため、内部で火災が発生した場合、発生する煙や熱気流により、環境が悪化し、当事者に危険が及ぶばかりでなく、後続車両への二次災害、交通流が遮断されることによる社会的な影響、火災に伴うトンネル本体や施設への損害が生じる恐れがある。過去の国内事例では、1979年に発生した東名高速の日本坂トンネル火災事故があり、渋滞後尾で発生した追突事故により発生した火災は次々に近傍の車両に燃え移り、173台もの車両が焼損、犠牲者7名もの被害が生じ、東名高速の静岡ICから焼津ICの間は復旧までに2ヶ月間を要している¹⁾。この火災事故の重大性に鑑み、1981年に道路トンネル防災施設設置基準が改訂され、トンネル等級と必要な防災設備の関係やそれらの仕様が明確化された。

海外に目を転じると、日本坂トンネル火災事故から20年目の1999年、フランスとイタリアの国境に位置するモンブラントンネルにおいて、小麦粉を積んだトラックから出火、その後の非常事対応の不味さなどから、焼失車両33台、犠牲者39名という大惨事が発生した(写真-1.1)²⁾。同年にはオーストリアのタウエルントンネル(犠牲者12名)(写真-1.2)³⁾、2001年にはスイスのゴットハルトトンネル(犠牲者11名)(写真-1.3)⁴⁾と、大規模なトンネル火災事故が対面通行のトンネルでたて続けに発生した⁵⁾。



写真-1.1 モンブラントンネル火災事故
(フランス-イタリア) 1999年3月 L=11 611m



写真-1.2 タウエルントネル火災事故
(オーストリア) 1999年5月 L=6 410m



写真-1.3 ゴットハルトトンネル火災事故
(スイス) 2001年10月 L=16 918m

これらの火災事故を重要視した欧州共同体では、国境を越えた産官学に連携による検討を重ね、2004年に道路トンネル非常用施設に関する欧州指令2004/54/EC(以降、「欧州指令⁶⁾」という)を発令した。この欧州指令は必要最小限の基本的な基準であるが、加盟国に対して拘束力があり、各国では各々、安全性向上に伴う基準が制定された。特徴的なのは、単に基準を順守するだけのものではなく、対象トンネルの安全性について、交通量や延長などのほか、配備される非常用施設種別や規模、運用体制などに対してリスクアナリシスを行い、比較検討のうえ安全対策の選定を行うよう各国に義務付けた点である。

一方、日本の高速道路では 1989 年頃より「対面通行トンネル」が増加傾向にある（図-1.1）。また、トンネル火災事故は東日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)が管理する高速道路トンネル（以下，高速道路トンネルとし，論文内の「トンネル」は特に断らない限り基本的に高速道路トンネルを示す）において年間 16 件程度発生しており，図-1.2 に示すとおり漸増傾向にあることが分かっている。また，表-1.1 に示すとおり，対面通行のトンネル火災事故の発生確率（件/億台・km）は，一方通行トンネルに比べ低いものの，犠牲者や負傷者が生じる被害が大きくなることが分かっている。

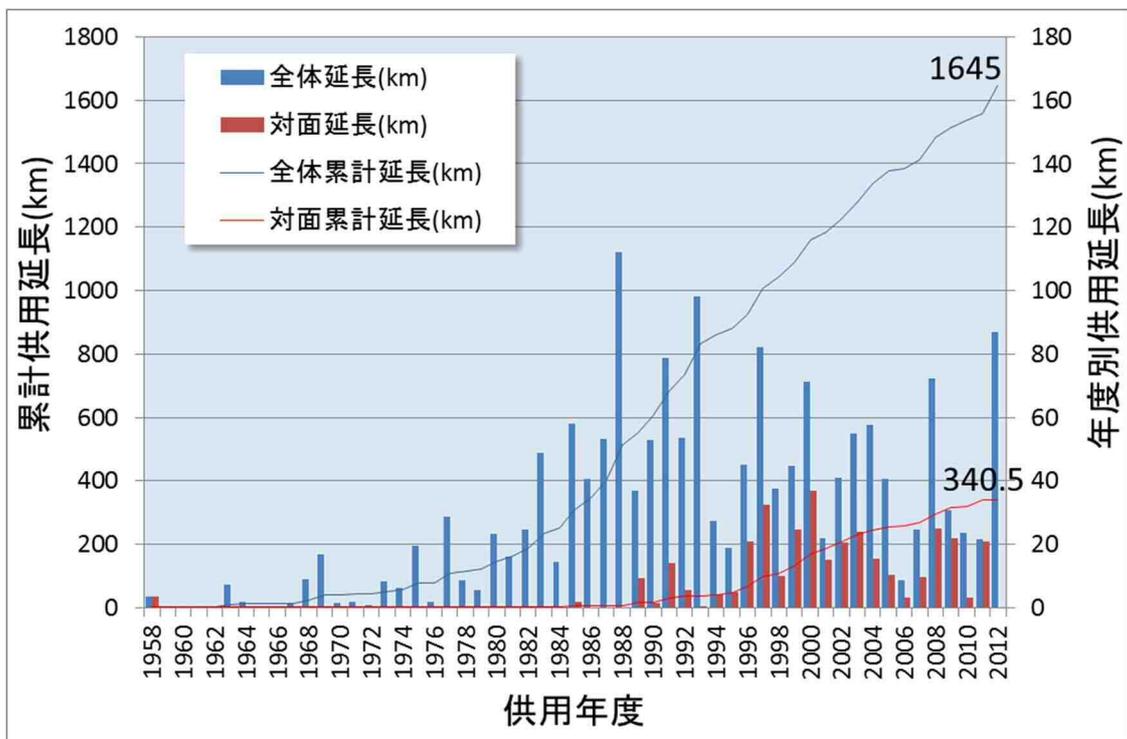


図-1.1 日本の高速道路トンネル数と延長の推移

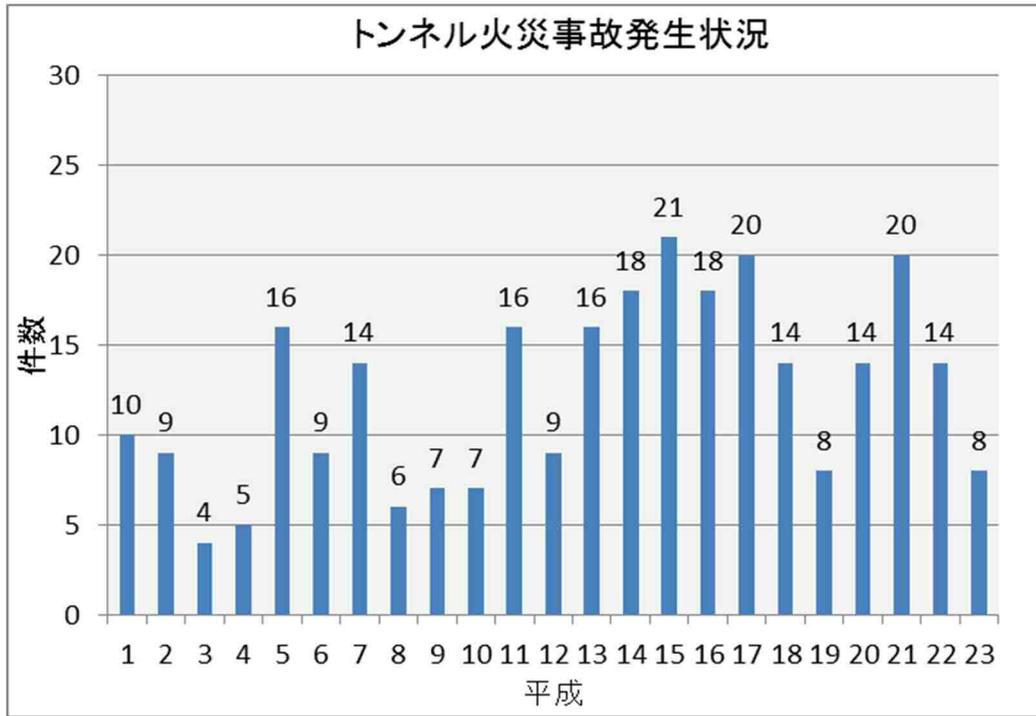


図-1.2 トンネル火災事故発生件数

表-1.1 交通形態別被害等平均データ

項目	単位	全体	一方通行	対面通行
トンネル長さ	m	3 298	3 372	2 799
交通量	台/日	21 658	23 191	11 588
火災事故発生確率	件/億台・km	30.7	32.3	20.1
消防隊到着	分間	23.5	23.1	27.2
通行止め時間	分間	131.6	132.6	124.8
犠牲者	人	0.131	0.111	0.263
負傷者	人	0.306	0.292	0.395
火災規模	MW	3.6	3.8	1.9

1.2 高速道路トンネルの現状

国土開発幹線自動車道計画全延長 11 520km のうち、2012 年度末時点で約 7 800 km の高速道路が供用しており、トンネル総延長(上下線の合計)は 1 645 km である。総計 1 748 本のトンネルのうち、対面通行のトンネル延長は、1989 年頃より増え始め、2012 年には 340.5km、全延長の 20.7%に達している。これらのほとんどは暫定措置として建設されたものであるが、中には暫定期間が長期化しているものもある。等級別のトンネル本数の割合は表-1.2 のとおりである。トンネル非常用施設の充実している AA 級は全体の 4.9%にとどまっている。なお、トンネル等級は、図-1.3 に示すとおり、過去の事故実績より、交通量とトンネル延長で決められており、5 段階に区分され、等級に合わせて非常用施設の設置基準などが決められている⁷⁾。トンネル内火災での避難行動を考えた場合、特に重要となる施設は、情報収集設備と情報提供設備である。情報収集設備とは、非常電話、火災検知器、監視装置(CCTV)などの、異常車両や火災を早期に発見するための設備であり、情報提供設備とは、情報板やラジオ再放送設備、拡声放送設備などの、トンネル内の人に火災や避難の情報や指示を伝える設備である。

表-1.2 等級別トンネル本数割合

	一方通行	対面通行	全数
AA	4.4%	0.5%	4.9%
A	24.0%	4.1%	28.1%
B	34.6%	8.1%	42.6%
C	10.0%	3.6%	13.6%
D	8.4%	2.3%	10.7%
total	81.4%	18.6%	100%

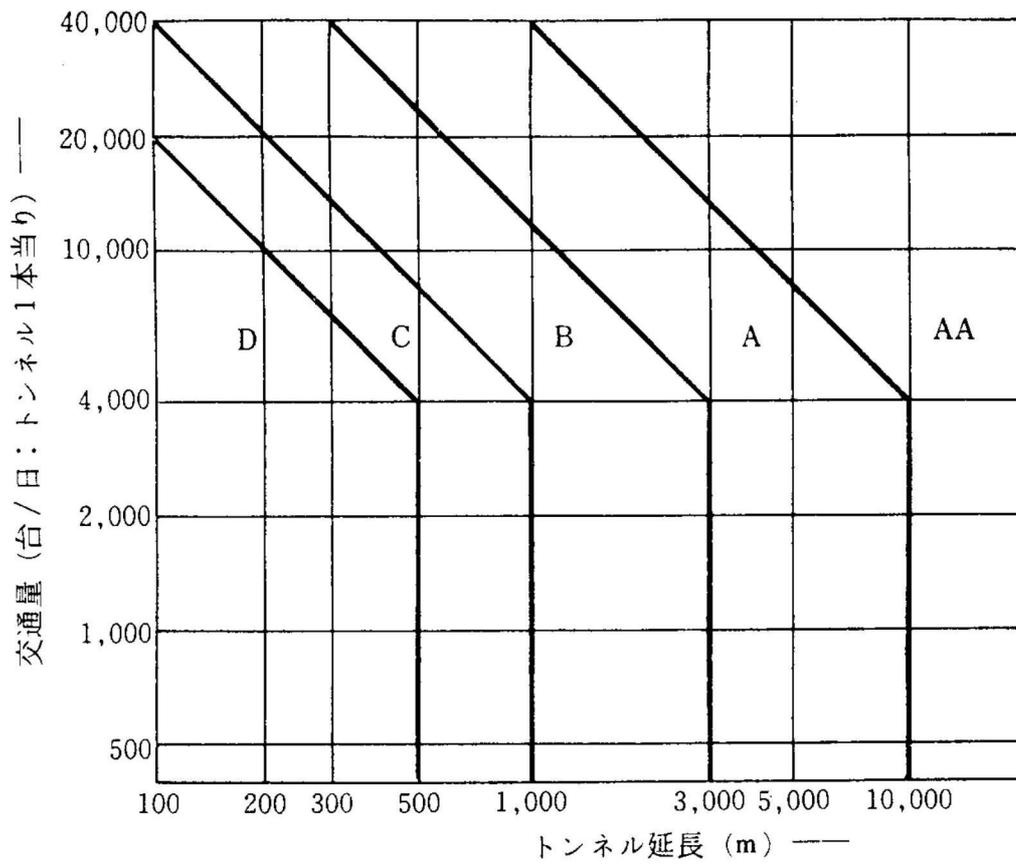


図-1.3 トンネルの等級区分⁷⁾

1.3 研究の目的

このような状況を改善するためには安全性向上のための対応が必要である。しかし、日本はトンネルが多いため、全ての高速道路トンネルの安全性を短期間で向上させることは困難であり、どこから先に手を付けたら良いのか、事業の優先度などを相対的に勘案する必要がある。

安全性を向上させる方策として、まず第一に、非常用施設、設備の増強が考えられる。既往の施設の追加対応や新たな施設の導入などを検討することとなるが、すべてのトンネルに設置するには、膨大な労力と時間、費用がかかる。そのためには、対策の必要なトンネルの選定と優先順位付け、対策の規模を決定することができる仕組みが必要となる。

一方で、それら増強した設備等をきちんと活用することができなければ、効果が上がり無駄な投資になってしまう懸念もある。避難者は、非常用施設に関する知識をつけ、有事の際には、施設・設備を100%活用することができなければならない。さらに、トンネル内の非常用施設は、想定したシナリオ（避難行動）に基づいて設置されているため、有事の際に避難者が想定通りの避難行動をとってくれることが大前提となっている。そのためには、啓発方法を工夫し、全ての高速道路利用者に周知していかなければならない。

これら設備の増強等と啓発が一体となって実施されなければ、効果的にトンネルの安全性を向上させることはできないと考える。

このため、第2章、第3章では、火災時の安全性を向上すべきトンネルの抽出、並びに効果的な改善対策方法の選定のため、欧州でトンネル安全性の評価にも用いられているリスクアナリシス手法を高速道路トンネルに適用する提案をする。第4章では、実際の避難行動事例を再度見直し、どのような啓発をすればよいか分析し、効果的な啓発内容を提案する。さらに、非常用施設の増強などの長期的対策を実行に移すまでの間の短期的な対応として、新たな取り組みを紹介する。

第 2 章 高速道路トンネルの統計的火災リスク評価

2.1 研究の枠組み

本研究では，日本の高速道路トンネルで蓄積された独自のトンネル火災事故統計データを用いた統計的，潜在的リスク評価を行い，リスク改善措置と代替案評価・選定手法について提案することを目的としている．**図-2.1** に本研究のフレームを示す．

(用語の説明)

統計的火災リスク：トンネル火災事故実績から求めた特定パラメータから推計式を作成して全てのトンネルに対してリスクを算定，現段階のリスクを相対比較するもの．推計式は火災事故発生確率と影響(人的，物的，社会的)である．但し，リスク改善策に対する効果の確認は経過観察となり，一定の観測期間を要する．

潜在的火災リスク：統計的火災リスクの影響のうち，人的影響に着目し，火災シミュレーションで求めた坑内環境の時刻歴データに対して，非常用施設と避難シナリオを組み合わせた避難シミュレーションを連成して影響(人的被害)の変化を確認・評価してリスク改善策を選定する．このため個々のトンネルの施設に応じた現実的なリスクと改善効果の把握を可能とする．

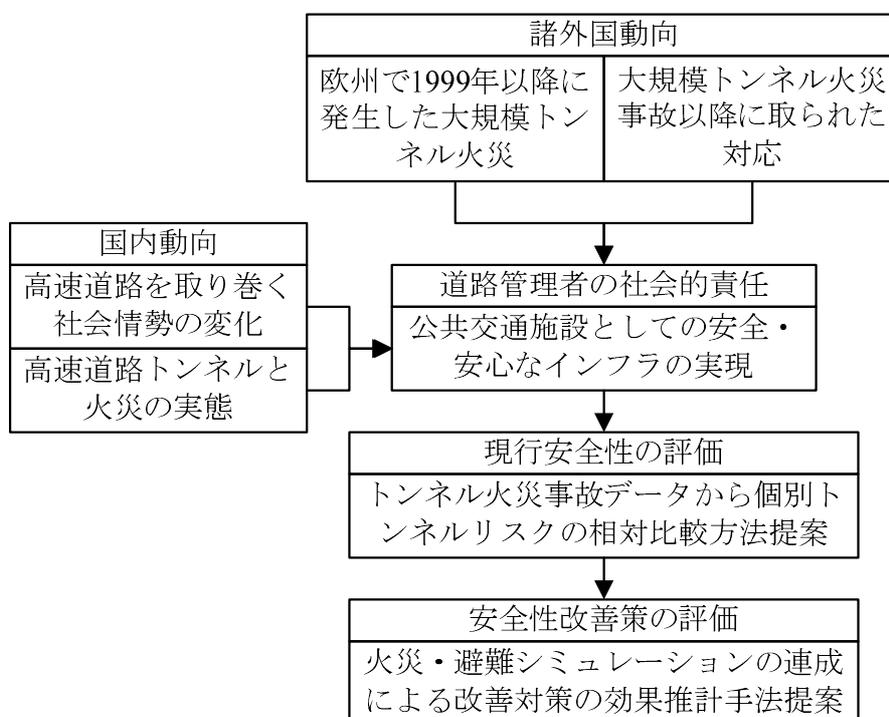


図-2.1 本研究のフレーム

2.2 トンネル火災事故と被害状況の統計

(1) 高速道路トンネルの現況

高速道路トンネルの延長推移は前述図-1.1 のとおり、全トンネル累計延長は2012年度で1,645kmに達している。これらのうち対面通行トンネルの延長は1989年（平成元年）頃より徐々に増加してきており、2012年度には340.5kmと全延長の20.7%に達している。また、全トンネル累計本数は1,748本、このうち対面通行は330本と全体の18.9%である。また、前述図-1.3に示す等級別には図-2.2に示す通り、B等級が最も多く、AA等級が最も少ない。

高速道路のトンネルと一般道のトンネルの比較をしてみると、一般道のトンネルは、サイズや線形、延長が変化に富み、非常用施設の設置状況もさまざまなことがあり、一定のルールに当てはめることができない場合が多い。全トンネルの約半数が高速道路トンネルであることなどから、まずは、高速道路トンネルの安全性を高めることから検討することが、効率的だと考えた。

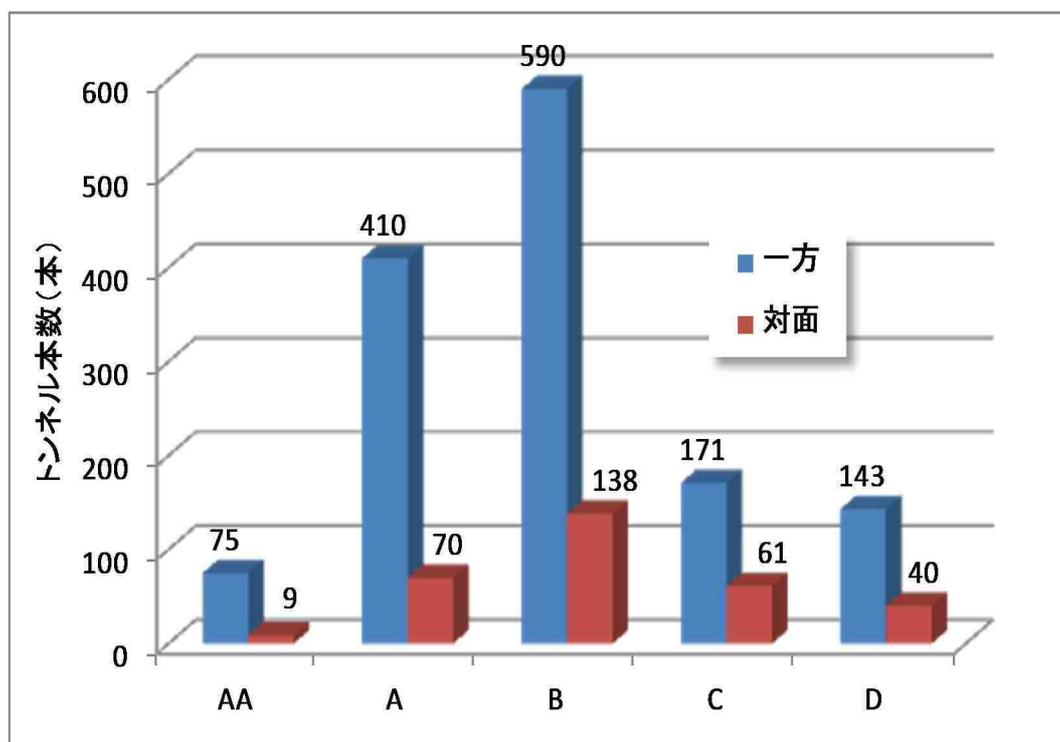


図-2.2 等級別トンネル本数

(2) トンネル火災事故データベース（以後データベースという）

高速道路トンネルの火災事故データは昭和 38 年の名神高速道路開通以来記録されている。本研究ではデータ収集項目の統一性を考慮し，平成元年以降の火災事故データ全 283 件を使用する。データベースには表-2.1 に示す項目が収集されており，発生日時，通行止め時間等の「時間データ」，トンネル名，交通形態，延長，交通量，トンネル等級等の「アセットデータ」，火災事故発生確率，火災形態，車種，燃焼時間，犠牲者，負傷者等の「火災データ」に大別される。

これらのうちトンネル火災事故発生確率は，当該トンネルの供用から火災が発生するまでの間を対象として式(1)で算定している。

$$\begin{aligned} \text{火災事故発生確率} = & \\ & \frac{\text{これまでの火災件数（件/年）}}{\text{供用開始からの経過年数（年）}} \end{aligned} \quad (1)$$

表-2.1 火災事故データベース収集項目

分類	項目	単位	記事
時間データ	年月日	年 月 日	火災発生
	時刻	時 分	火災発生
	火災覚知までの時間	分間	管制室が確認
	消防隊出動要請までの時間	分間	火災覚知から
	消防隊到着までの時間	分間	要請から
	水噴霧放水までの時間	分間	覚知から
	水噴霧放水時間	分間	放水開始から
	燃焼時間	分間	火災覚知から
	通行止め時間	分間	火災覚知から
アセットデータ	トンネル名	—	発災トンネル
	路線名	—	道路
	区間	—	IC 間
	交通形態	—	一方/対面
	上下別	—	上下 (右左)
	延長	m	当該トンネル
	設備等級	—	AA, A, B, C, D
	日交通量	台/日	当該トンネル
	年間交通量	台/年	当該トンネル
火災データ	火災事故発生確率	件/年	式(1)
	火災形態	—	単独, 複数
	出火原因	—	事故, 車両
	出火原因車両	—	小型, 大型等
	事故形態	—	単独, 複数
	消火栓の使用	—	使用, 未使用
	消火器の使用	—	使用本数
	犠牲者	人	原因特定せず
	負傷者	人	原因特定せず
トンネル本体被害	規模	路面, 壁面, 施設	

(3) トンネル火災事故

平成元年からの高速道路トンネル火災事故発生数の推移を前述図-1.2 に示す。火災事故は毎年4～21件発生，平均で12.3件/年，概ね月1回発生している。

等級別の傾向を表-2.2 に示す。一方通行，対面通行ともに本数が最も少ないAA等級の火災事故が最も多く，D等級では発生していないことが分かる。

トンネル火災事故原因車両を分類すると，図-2.3 に示す通り，乗用車系と貨物系がほぼ同じ割合である。

トンネル火災事故の出火原因に関して図-2.4に示す通り，7割が車両故障に起因し，3割が交通事故によるものであり，単独事故と複数事故の割合はほぼ同一である。

表-2.2 トンネル等級別火災発生件数

設備等級	全体(件)	一方(件)	対面(件)
AA	132	117	15
A	102	84	18
B	34	33	1
C	15	11	4
総計	283	245	38

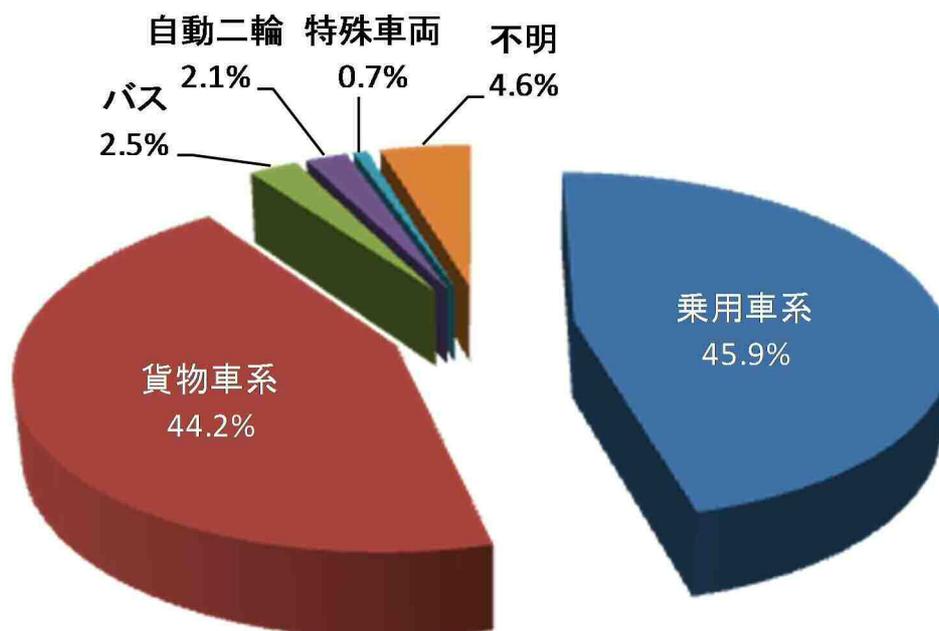


図-2.3 トンネル火災事故原因車両

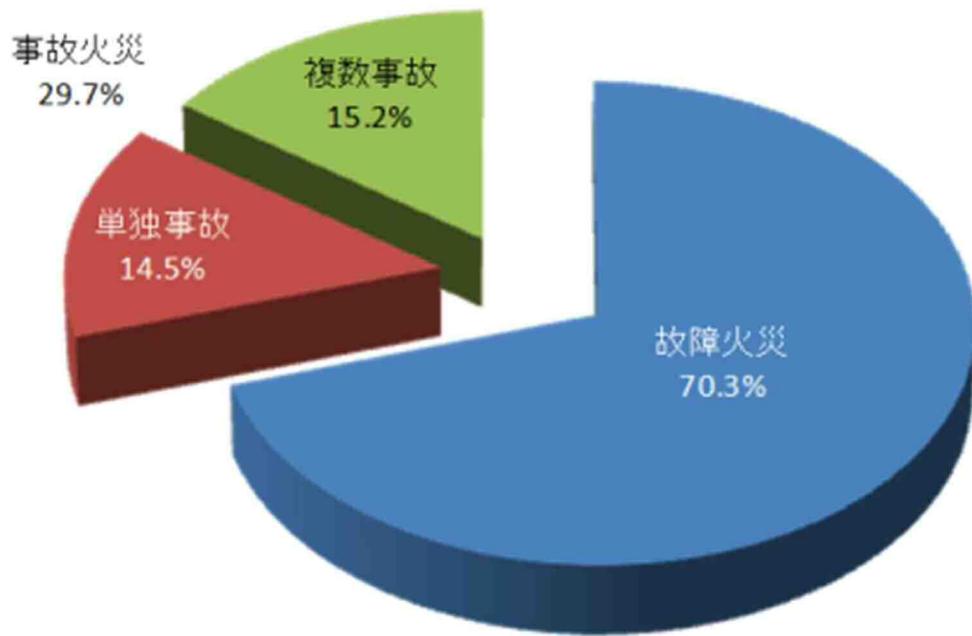


図-2.4 トンネル火災事故車両出火原因

(4) トンネル火災規模の推計

トンネル火災事故データベースには前述表-2.1 に示すとおり出火原因車両，事故形態（台数），燃焼時間が記録されており，本研究では PIARC 資料⁸⁾などを参考に表-2.3 に示す車両燃焼速度から，相対比較のため推計火災規模 HRR_e を算出することを試みた。

表-2.3 主な車種と燃焼速度： Hrr

車種	燃焼速度(MW)
軽乗用車	2.5
普通乗用車	5
マイクロバス	10
普通貨物車	20
大型貨物車	30
大型バス	30
タンクローリー	100

トンネル火災事故データベースから式(2)を用いて火災規模を推計し，規模毎の生起率を表-2.4に取りまとめた。全体では推計規模5MWクラスの火災が最も多く発生しており，30MWクラスの火災は僅か0.7%であることが分かる。

$$HRR_e = \sum Hrr \times C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (2)$$

ここに，

Hrr ：表-3 に示す車両燃焼速度

C_1 ：燃焼時間係数(仮に 120 分に対する実燃焼時間)

C_2 ：複合火災係数(単独 1.0, 複数 2.0, 不明 1.5)

C_3 ：被害規模係数(0.2, ~2.0, 通常 1.0 施設被害に応じ加減)

表-2.4 推計火災規模の生起率

規模クラス	全体(%)	一方通行(%)	対面通行(%)
0 MW	21.3	19.0	36.8
5 MW	54.0	54.2	52.6
10 MW	19.9	21.3	10.5
20 MW	4.1	4.7	0.0
30 MW	0.7	0.8	0.0

(5) 被害状況

高速道路トンネル火災事故に伴う犠牲者，負傷者を表-2.5 に示す．出火原因は前述図-2.4 に示した通り，故障火災が多いが，犠牲者，負傷者は共に事故火災の方が多い．しかしながら，データベースには犠牲・負傷の原因（事故，または火災）は明確に記載されていないため，本研究では火災由来として取り扱っている．次に表-2.6 に交通形態別に被害等平均データを取りまとめた．平均値で比較すると，延長，交通量，火災事故発生確率，通行止め時間，火災規模は一方通行の方が大きい，犠牲者や負傷者に関しては対面通行の方が大きい．対面通行は，一方通行に対して火災事故は発生しづらいが，発生すると被害は大きくなる傾向があることが判明した．

表-2.5 平成元年度以降のトンネル火災事故犠牲者，負傷者

種別	交通形態	犠牲者(人)	負傷者(人)
故障火災	一方	2	10
	対面	1	1
事故火災	一方	26	64
	対面	9	14
総計		38	89

表-2.6 交通形態別被害等平均データ

項目	単位	全体	一方通行	対面通行
トンネル長さ	m	3,298	3,372	2,799
交通量	台/日	21,658	23,191	11,588
火災事故発生確率	件/億台・km	30.7	32.3	20.1
消防隊到着	分間	23.5	23.1	27.2
通行止め時間	分間	131.6	132.6	124.8
犠牲者	人	0.131	0.111	0.263
負傷者	人	0.306	0.292	0.395
火災規模	MW	3.6	3.8	1.9

2.3 統計的火災リスク評価

(1) トンネル火災評価の考え方

高速道路トンネル火災事故データ分析による被害状況等から，相対的な安全性比較・評価手法としてリスク評価手法について検討を行う．一般的にリスクとは，被害の発生頻度（確率）とその被害の程度（影響）の組み合わせであり式(3)で求められる⁹⁾．

$$R = P \times I = f(P, I) \quad (3)$$

ここに，

R ：リスク

P ：被害の発生頻度（確率）

I ：被害の程度（影響）

ここで算出されたリスクは図-2.5 に示すようなリスクマトリクスの形式で可視化することで、リスク管理対象施設のリスク状況が可能となる。

本研究では前出のトンネル火災事故データベースに記載されているデータの分析を行い“統計的リスク”を算出して現状のトンネルリスクを評価する。

高 ↑ 被害の発生頻度(確率) ↓ 少	改善	改善	使用停止	使用停止	
	要注意	要注意	改善	使用停止	
	問題なし	要注意	要注意	改善	
	問題なし	問題なし	要注意	改善	
	小	←	被害の程度(影響)	→	大

図-2.5 リスクマトリクスの例

(2) 火災発生頻度の推計

高速道路トンネル火災は図-2.6 に示す通り車両系と事故系のものに大別され、事故系火災の場合、交通事故の発生から出火することが分かっている。これらの火災事故発生頻度を目的変数、表-2.7 に示す出火原因と考えられるパラメータを説明変数として、考察により支配要因を絞り込み、重回帰分析を行い、火災発生頻度予測のためのモデル式生成を試みた。なお、重回帰分析により導かれる説明変数の係数や定数項の信頼性を確認するために t 値、目的変数の精度を示す決定係数 R^2 を比較確認する。様々な統計分析手法の中で、本研究ではこの手法を用いたが、現時点では定性的評価であり、定量的評価には至っていないため、検討の余地がある。精度の向上は今後議論していきたい。

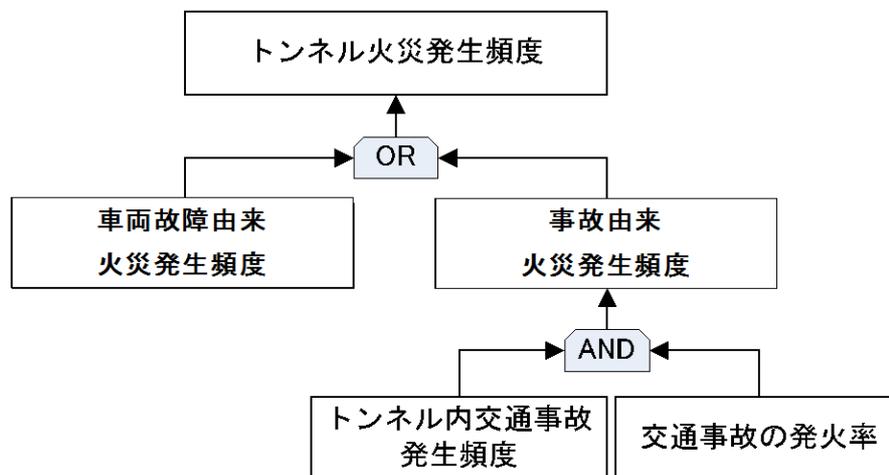


図-2.6 トンネル火災事故発生頻度の構成

表-2.7 出火原因と考えられるパラメータ

項目
トンネル延長
トンネル交通量
大型車混入率（大型交通量）
交通形態（一方/対面）
最大勾配
坑口標高
走行速度
発火率（トンネル内交通事故件数から火災事故件数へ移行する割合）

a) 車両系火災発生頻度

車両系火災のパラメータと t 値, R^2 の関係は以下の通りとなった。
 トンネル等級の基本であるトンネル延長と交通量による分析結果は表-2.8 に示すとおり, 決定係数が 0.3368 であり, t 値はトンネル延長に対して 7.668 であったが, 交通量に対しては 0.743 と低い値であった。このため, 車両系の火災事故 (未記入を除く 180 件を対象) の出火原因を確認したところ, エンジン由来の出火が 41% と最も多ことから, 出火原因をオーバーヒートと推計し, 道路構造による原因をトンネル勾配, トンネル入口までの登り坂延長, 坑口の標高, 並びに日交通量に関しても大型車に着目し, 予備的に検討した。その結果は, 表-2.9 に示すとおり。説明変数として標高, 交通量に関しても大型車交通量の適合性が高いことが分かった。決定係数は 0.451 に向上し, t 値に関しても目安と言われている値 ($t \geq |2|$) をほぼクリアしている。

表-2.8 車両系火災評価(1)

決定係数 R^2 : 0.3368	係数	t 値
トンネル延長(m)	2.60×10^{-5}	7.668
交通量(台/日)	5.44×10^{-7}	0.743

表-2.9 車両系火災評価(2)

決定係数 R^2 : 0.4510	係数	t 値
トンネル延長(m)	1.86×10^{-5}	5.357
大型車交通量(台/日)	2.68×10^{-6}	1.979
標高(m)	1.62×10^{-4}	4.624

この結果から車両系火災発生頻度は式(4)で示される。

$$P_b = 1.86 \times 10^{-5} \times L + 2.68 \times 10^{-6} \times HV + 1.62 \times 10^{-4} \times H - 0.00103 \quad (4)$$

ここに,

P_b : 車両系火災発生頻度 (件/年)

L : トンネル延長 (m)

HV : 大型車交通量 (台/日)

H : 標高 (m)

選定したパラメータは、この場合、延長、標高、大型車交通量の順で影響が大きい。なお、延長の分布は図-2.7、標高の分布は図-2.8に示す。

ただし、決定係数は向上したものの、まだ十分とは言えない状況であるため、今後の検討で改善していく余地がある。

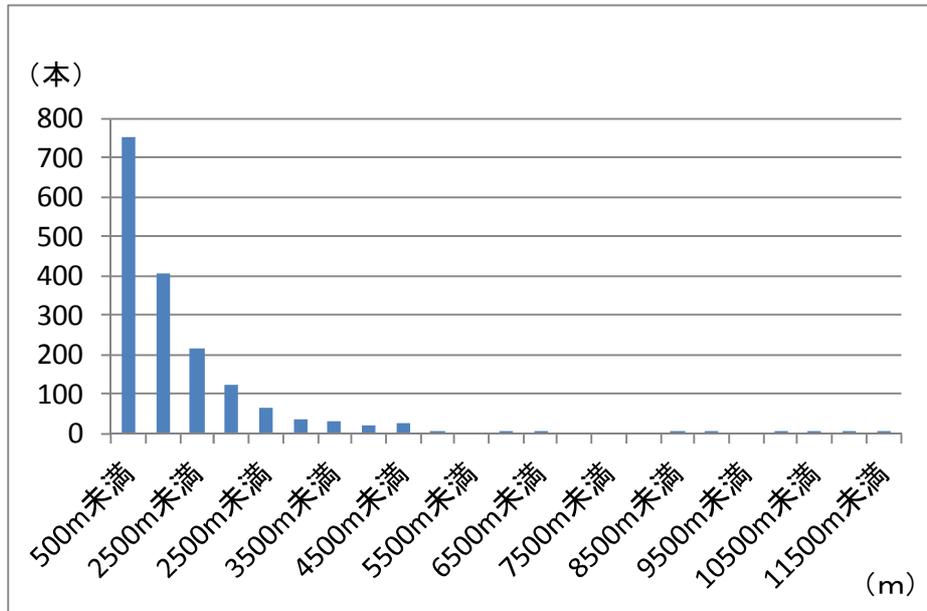


図-2.7 延長別トンネル数の分布

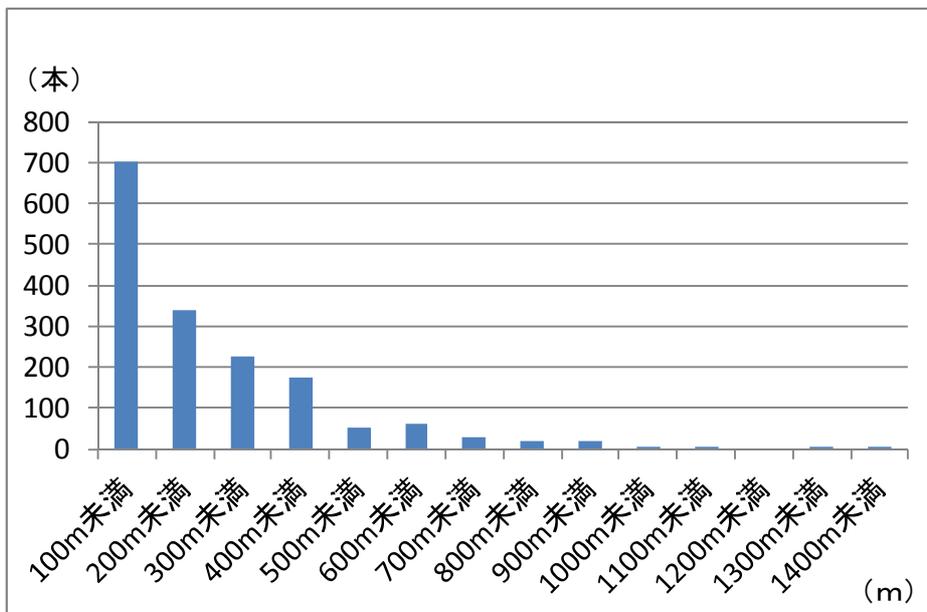


図-2.8 標高別トンネル数の分布

b) 事故系火災発生頻度

事故系火災はトンネル内で発生する交通事故に由来するもので、高速道路トンネルで発生した交通事故データ（集計期間 1995 年～2011 年、全 50 万件）からトンネル毎の交通事故発生頻度を算出し、交通事故から火災に移行する割合を発火率と定義して求めることとした。トンネル内交通事故に影響を及ぼすパラメータと t 値、 R^2 の関係は以下の通りとなった。

車両系火災同様にトンネル等級の基本であるトンネル延長と交通量による分析結果は表-2.10 に示すとおり、決定係数が 0.5251、 t 値はトンネル延長に対して 32.691、交通量に対して 19.187 であった。交通事故に関しては、走行速度や交通形態をパラメータに加え、分析を行った結果を表-2.11 に示す。表-2.11 に示す通り、決定係数は 0.5609 に向上、 t 値に関しても十分な信頼性が確認できた。なお、走行速度差とは、全国平均トンネル内走行速度(実績平均 77 km/h)と当該トンネル内実走行速度との差分とし、交通形態係数は一方通行と対面通行の違いを表す。次に各年（1995 年から 2011 年の高速道路トンネル火災を対象としている）の発火率を表-2.12 に整理したところ、平均で 0.0020 件/事故件数であることが分かった。

ただし、式(4)同様、決定係数は向上したものの、まだ十分とは言えない状況であるため、今後の検討で改善していく余地がある。

表-2.10 交通事故の評価(1)

決定係数 R^2 : 0.5251	係数	t 値
トンネル延長(m)	9.810×10^{-4}	32.691
交通量(台/日)	6.588×10^{-5}	19.182

表-2.11 交通事故の評価(2)

決定係数 R^2 : 0.5609	係数	t 値
トンネル延長(m)	1.000×10^{-3}	34.550
交通量(台/日)	6.189×10^{-5}	18.511
走行速度差	2.05×10^{-2}	3.855
交通形態係数	-0.7898	-7.525

表-2.12 高速道路トンネル内交通事故の発火率

年次	トンネル内 事故件数	事故系 火災件数	発火率
1995	2 138	4	0.0019
1996	2 384	2	0.0008
1997	2 328	3	0.0013
1998	2 416	2	0.0008
1999	2 627	2	0.0008
2000	2 976	3	0.0010
2001	2 567	7	0.0027
2002	2 500	8	0.0032
2003	2 768	10	0.0036
2004	2 629	4	0.0015
2005	2 560	5	0.0020
2006	2 241	5	0.0022
2007	1 463	6	0.0041
2008	1 273	2	0.0016
2009	1 487	4	0.0027
2010	1 628	3	0.0018
2011	1 834	3	0.0016
平均			0.0020

これらの結果から、事故系火災発生頻度は式(5)で示すことができる。

$$P_f = (1.00 \times 10^{-3} \times L + 6.189 \times 10^{-5} \times T + 2.05 \times 10^{-2} \times S - 0.7898 \times FT - 7.397) \times 0.0020 \quad (5)$$

ここに、

P_f ：トンネル毎の事故系火災発生頻度（件/年）

L ：トンネル延長（m）

T ：交通量（台/日）

S ：走行速度差（km/h）

FT ：通行形態係数（対面：1，一方：0）

式(5)の最右項：0.0020 は発火率である。

c) トンネル火災発生頻度

前節までに求めた車両系火災発生頻度と事故系火災発生頻度を用い、当該トンネルの火災発生頻度 P_t を式(6)に示す。

$$P_t = P_b + P_f \quad (6)$$

(3) 火災に伴う被害

道路トンネル火災発生に伴う損失に関しては、データベースに記載されている犠牲者・負傷者の総称としての「人的損失」、トンネル本体被害の「物的損失」、火災に伴う通行止めにより利用者が被る「社会的損失」と定義する。これら三種類の損失について、火災事故発生頻度同様にモデル化を試みた。

a) 人的損失

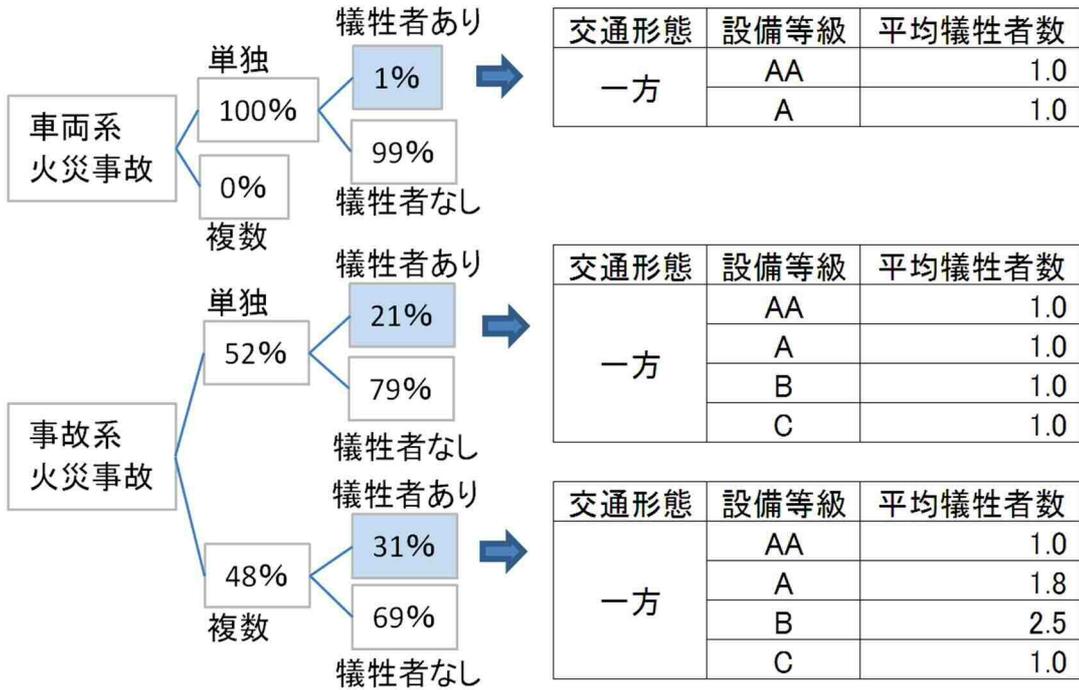
データベースを分析し、トンネル火災事故に伴う人的損失の要因について、交通形態、出火原因、火災形態とし、トンネル等級ごとに、犠牲者数に関するイベントツリーを図-2.9、負傷者数に関するイベントツリーを図-2.10に取りまとめた。

犠牲者に関しては、図-2.9 に示すとおり、一方通行、対面通行共に故障由来の単独火災は 100%である。このときの犠牲者は一方通行で 1%（平均 AA 等級：1 名，A 等級：1 名），対面通行で 3%（平均 AA 等級：1 名）と少ない。次に、交通事故由来の事故系火災においては、一方通行の単独事故と複数事故がほぼ同率であるが、対面通行では複数事故の割合が 73%にもものぼることが分かる。また、犠牲者が生じる割合も、一方通行の単独事故で 21%，複数事故で 31%に対して、対面通行では単独事故で 67%，複数事故で 63%と高いことが分かる。平均犠牲者数に関しては、一方通行、対面通行共に複数事故の方が多いたことが確認できる。

負傷者に関しては、図-2.10 に示すとおり、一方通行、対面通行共に故障由来の単独火災は同様に 100%である。このときの負傷者は一方通行で 5%，対面通行で 3%と少ない。次に、負傷者が生じる割合は、一方通行の単独事故で 21%，複数事故で 54%に対して、対面通行では単独事故で 33%，複数事故で 63%と高いことが分かる。平均負傷者数に関しても犠牲者同様に、一方通行、対面通行共に複数事故の方が多いたことが確認できる。

【一方通行】

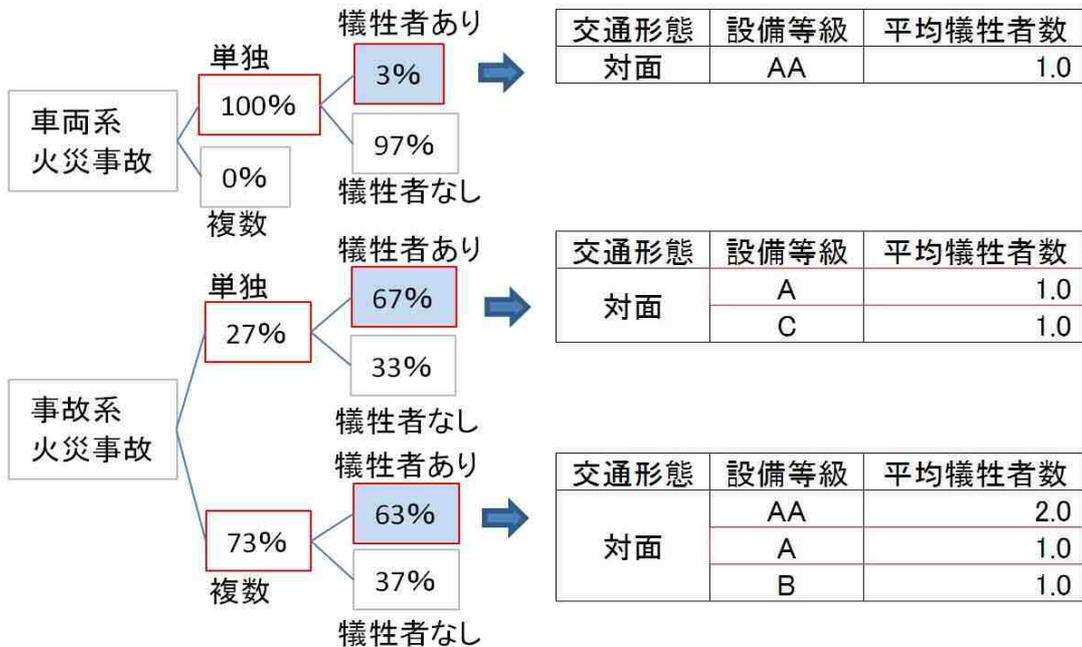
死亡事故1件あたりの平均犠牲者数



(a) 一方通行

【対面通行】

死亡事故1件あたりの平均犠牲者数

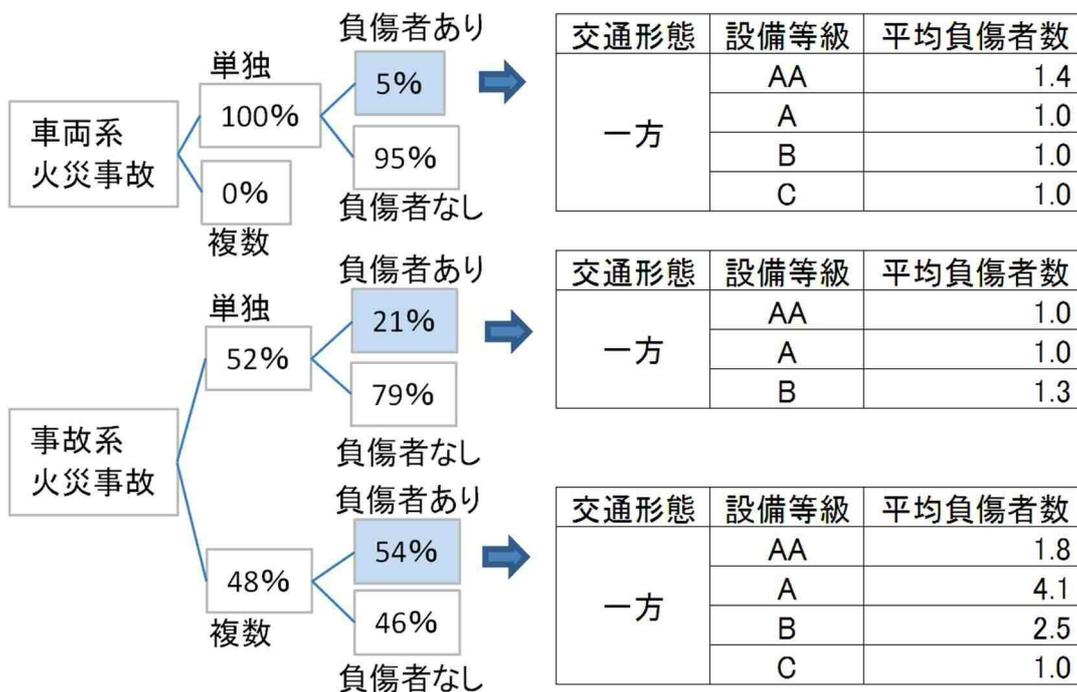


(b) 対面通行

図-2.9 犠牲者発生ツリー

【一方通行】

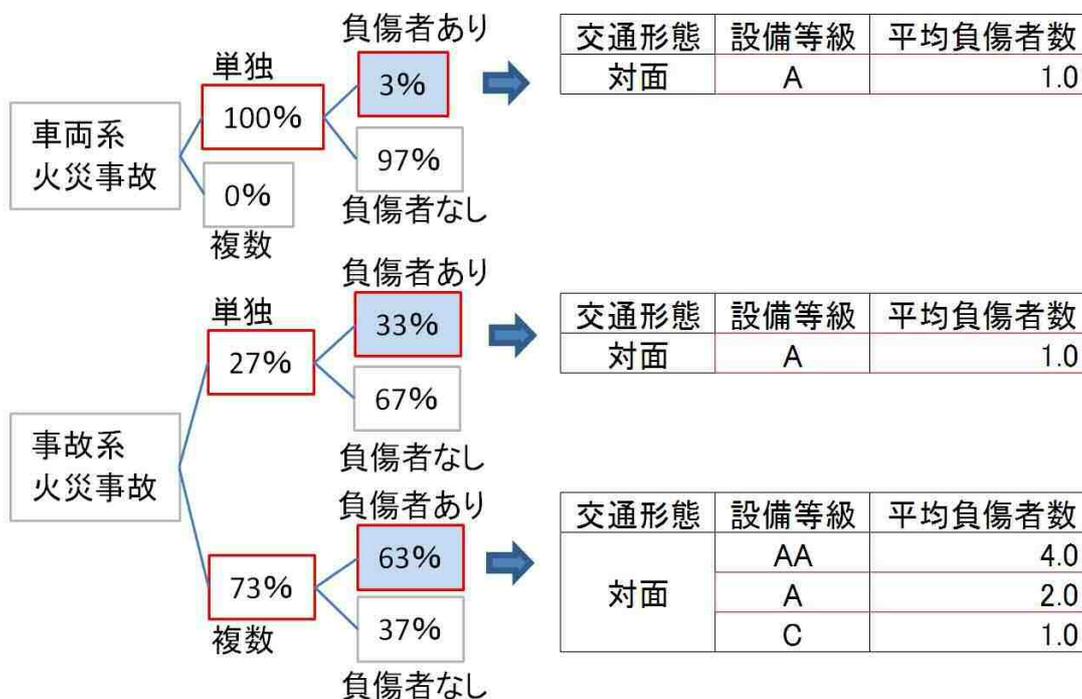
負傷事故1件あたりの平均負傷者数



(a) 一方通行

【対面通行】

負傷事故1件あたりの平均負傷者数



(b) 対面通行

図-2.10 負傷者発生ツリー

車両系火災の人的損失を式(7)，事故系火災の人的損失を式(8)で表す。

$$I_{H,u} = L_D \times E_{D,u,T,R} + L_I \times E_{I,u,T,R} \quad (7)$$

ここに，

$I_{H,u}$ ：車両系火災の人的損失（円/件）

L_D ：1人あたりの死亡損失額（円/人）

$E_{D,u,T,R}$ ：1車両系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想犠牲者数（人/件）

L_I ：1人あたりの負傷損失額（円/人）

$E_{I,u,T,R}$ ：1車両系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想負傷者数（人/件）

$$I_{H,f} = L_D \times E_{D,f,T,R} + L_I \times E_{I,f,T,R} \quad (8)$$

ここに，

$I_{H,f}$ ：事故系火災の人的損失（円/件）

L_D ：1人あたりの死亡損失額（円/人）

$E_{D,f,T,R}$ ：1事故系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想犠牲者数（人/件）

L_I ：1人あたりの負傷損失額（円/人）

$E_{I,f,T,R}$ ：1事故系火災あたりの一方/対面別設備等級別予想負傷者数（人/件）

式(7)，(8)の一人あたりの死亡損失額，負傷損失額に関しては，内閣府資料¹⁰⁾に示された損失額(死亡の場合2億4450万円，後遺障害の場合1830万円)を代入して算出する。人的損失の総額： I_H は式(9)で算出する。

$$I_H = I_{Hu} + I_{Hf} \quad (9)$$

これまでに提示した車両系火災発生頻度と事故系火災発生頻度の算定式と、これら火災事故発生に伴う人的損失（犠牲者，負傷者）算定式より，人的被害試算結果を以下に示す。（試算例：対面通行 A 等級トンネル）

1) 犠牲者発生に伴う損失

トンネル火災発生要因は車両系と事故系に分類され，式(4)，(5)で求められる。また，火災に伴う犠牲者は図-2.9 の(b)対面通行に示すイベントツリーの分岐確率（図中赤枠表示）と式(7)，(8)で算出が可能である。これらを連立することで以下の通り算出することが可能となる。

犠牲者数

$$I_{H,u} = \frac{\overbrace{1 \times 0.03 \times 0 \times P_b}^{\substack{\text{車両系} \\ \text{単独} \\ \text{平均犠牲者}}} + \overbrace{(0.27 \times 0.67 \times 1 + 0.73 \times 0.63 \times 1)}^{\substack{\text{事故系} \\ \text{単独} \\ \text{平均犠牲者}}} \times \overbrace{P_f}^{\substack{\text{事故系} \\ \text{複数} \\ \text{平均犠牲者}}}}{P_t}$$

$$I_{H,u} = \frac{0.64 \times P_f}{P_t} \times 244,500,000$$

2) 負傷者発生に伴う損失

上記同様に負傷者発生に伴う損失は図-2.10 の(b)対面通行に示すイベントツリーの分岐確率（図中赤枠表示）と式(7)，式(8)で算出することが可能である。

負傷者数

$$I_{H,f} = \frac{\overbrace{1 \times 0.03 \times 1 \times P_b}^{\substack{\text{車両系} \\ \text{単独} \\ \text{平均犠牲者}}} + \overbrace{(0.27 \times 0.33 \times 1 + 0.73 \times 0.63 \times 2)}^{\substack{\text{事故系} \\ \text{単独} \\ \text{平均犠牲者}}} \times \overbrace{P_f}^{\substack{\text{事故系} \\ \text{複数} \\ \text{平均犠牲者}}}}{P_t}$$

$$I_{H,f} = \frac{0.03 \times P_b + 1.01 \times P_f}{P_t} \times 18,340,000$$

b) 物的損失

物的損失とは、火災事故が発生した際のトンネル施設の損傷をいう。データベースには「路面被害」、「壁面被害」、「照明器具被害」、「ケーブル全般被害」が記録されており、これらを分析して物的損失を算出する。

表-2.13～2.16 はトンネル内施設の物的損失状況である。これらはトンネル火災事故データベースより抽出したものであるが、被害要因の因果関係を分析するためにはデータが不足していることから、本検討では 4 つの被害はそれぞれ独立した事象として取り扱うこととした。

分析の結果、交通方式よりも設備等級の方が損害発生確率に影響があること、設備等級が AA から C に低下するに従い、被害規模が拡大していることが分かる。これは、トンネル等級が低下するに従い、非常用施設グレードが低下することが影響するものと推測される。なお、実績上、D 等級トンネルでは物的被害が発生していないことから、計算上は C 等級の結果を用いることとする。

表-2.17 は補修実績単価からトンネル等級別に物的被害の期待値を計算したものである。前述のとおり D 等級トンネルの物的被害額の期待値は C 等級と同一としている。

表-2.13 火災事故あたりの路面被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	路面平均被害面積(m ²)	期待被害面積(m ²)
AA	4	52	1.95
A	9		4.55
B	15		7.58
C	20		10.30

表-2.14 火災事故あたりの壁面被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	壁面平均被害面積(m)	期待被害長(m)
AA	8	34	2.85
A	16		5.37
B	15		5.04
C	27		9.13

表-2.15 火災事故あたりの灯具被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	灯具平均被害数 (灯)	期待被害数(灯)
AA	4	12	0.47
A	11		1.34
B	15		1.87
C	60		7.48

表-2.16 火災事故あたりのケーブル被害発生確率と被害規模

設備等級	被害発生確率(%)	ケーブル平均被害 延長(m)	期待被害延長(m)
AA	6	2.93	17.78
A	17		48.90
B	21		60.41
C	53		156.48

表-2.17 火災事故あたり物的損失（期待値）

設備等級	物的被害の期待値(円)
AA	956 803
A	2 372 100
B	3 062 897
C	6 582 455
D	6 582 455

これら物的損失は、式(10)で算出することが可能となる。

$$I_p = \sum_i \sum_C R_i \times E_{i,C} \quad (10)$$

ここに、

I_p : 1 火災事故当たりの物的損失 (円)

R_i : 各被害原単位当たりの復旧費用
(円/m, 円/m², etc.)

$E_{i,C}$: 各被害・設備等級毎の期待被害量
(m, m², etc.)

c) 社会的損失

社会的損失は火災事故によりトンネルが通行止めとなることで社会に及ぼされる損失とした。通行止め時間の交通方式毎の平均およびヒストグラムは図-2.11の通り。平均値を比較すると、表-2.18に示す通り、一方通行トンネルの方がわずかに高い値となっており、ヒストグラムを見ても交通方式ごとに特別有意な差が生じているわけではないことがわかる。

このため通行止め時間を被説明変数として、交通方式（一方通行=1，対面通行=0），延長，日交通量，犠牲者の有無（有=1，無=0），物的損害の有無（有=1，無=0）で回帰分析を行った。

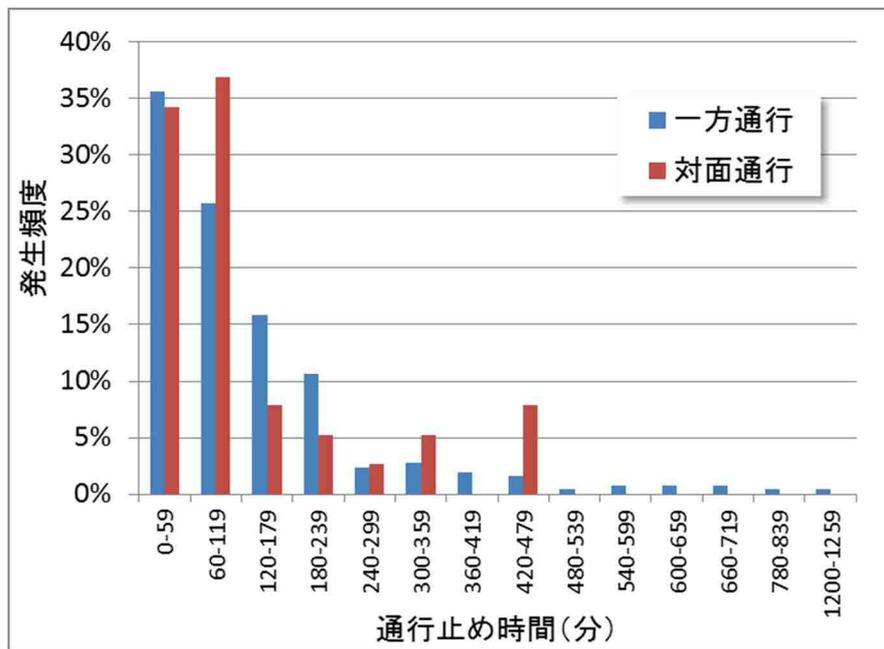


図-2.11 交通形式ごとの平均通行止め時間および通行止め時間

表-2.18 交通方式別火災事故件数と平均通行止め時間

	火災事故件数(件)	1火災事故当たり 平均通行止め時間(分)
一方通行	253	133
対面通行	38	125

結果は表-2.19のとおりであり、 t 値の大きさから犠牲者と物的損害の有無が通行止め時間に大きく影響していることがわかる。このため、推計においては犠牲者の有無と物的損害の有無ごとに通行止め時間を設定して計算を行う。設定した値は表-2.20に示す通り、過去の火災事故の犠牲者の有無・物的損害の有無ごとの平均通行止め時間とした。

社会的損失を数式で表すと以下のようなになる。通行止め時間に、足止めされている人数（交通量×平均乗車人数）と1人・1時間あたりの社会的損失原単位を乗じている。社会的損失原単位および1台当り平均乗車人数はCVM(仮想評価法)手法¹¹⁾によるアンケート調査により把握した(表-2.21参照)。

表-2.19 通行止め時間の評価

決定係数 R^2 : 0.22	係数	t 値
切片	91.410	3.70
交通方式	37.477	1.58
トンネル延長	-0.004	-1.39
日交通量	-0.001	-1.80
犠牲者の有無	130.538	4.90
物的損害の有無	116.853	5.64

表-2.20 犠牲者・物的損害と平均通行止め時間

(単位：時間)

		犠牲者	
		有り	無し
物的損害	有り	360	216
	無し	212	96

表-2.21 社会的損失推定に用いる原単位

分類	U_w (支払意思)	U_w (受入補償)	U_{travel} (平均乗車人数)
大型車・業務目的	1 382 円/人・時間	4 471 円	4.51 人
上記以外	797 円/人・時間	2 918 円	2.44 人

なお、データベースに保存されている交通量は断面交通量であることから、一方通行トンネルの社会的影響額を算出する際、データベースから引用した交通量を2分の1にして式(11)に代入することで計算が可能である。

$$I_s = \sum_i T_i \times P_i \times V \times U_w \times U_{travel} \quad (11)$$

ここに、

I_s : 1 火災事故当たりの社会的損失 (円)

T_i : 犠牲者・物的損害の有無毎の平均通行止め時間 (hr)

P_i : 犠牲者・物的損害の有無毎の1火災事故当たりの発生率

V : 1時間当たりの交通量 (台)

U_w : 通行止め1人・1時間当たりの社会的損失原単位 (支払意思額: 円/人・時間)

U_{travel} : 1台当たりの平均乗車人数 (人/台)

(4) リスクマトリクス作成

これまでに示したトンネル火災事故発生頻度と損失（人的+物的+社会的）について，高速道路トンネル全体で試算し，相対比較のため図-2.12 に示す散布図（リスクマトリクス）を作成し，トンネル区分毎に平均値を表-2.22 に取りまとめた。

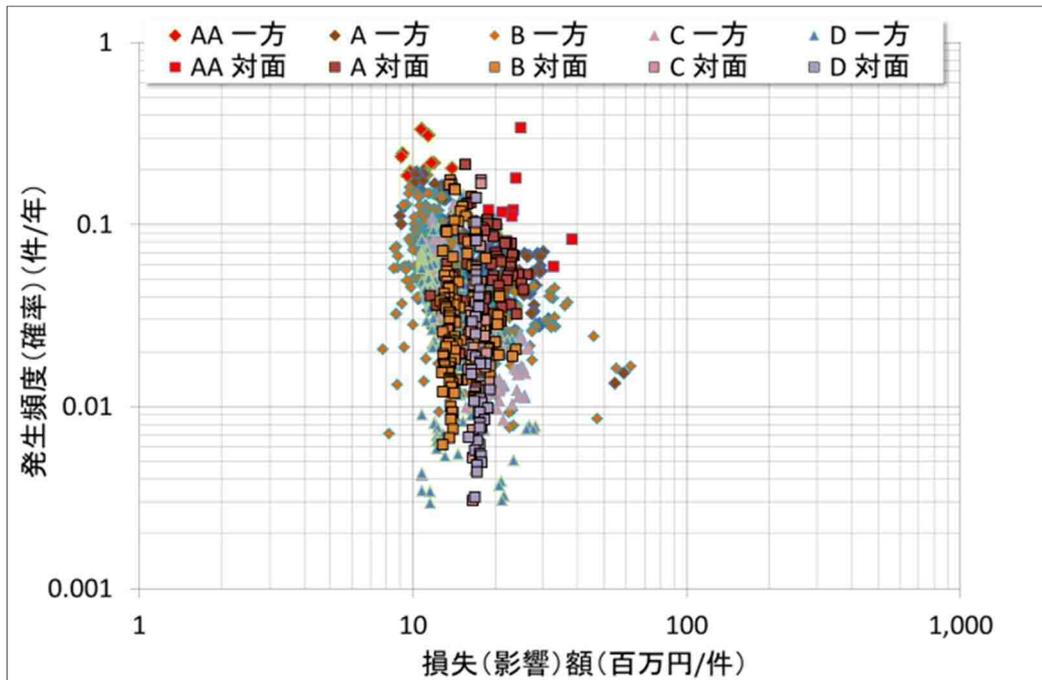


図-2.12 高速道路トンネルの火災事故リスクマトリクス

表-2.22 トンネル区分別試算結果の平均値

区分	トンネル数	発生頻度 P (件/年)	損失(影響) I (円/件)	リスク R (円/年)
AA 一方	63	1.44×10^{-1}	12 891 637	1 853 310
A 一方	367	6.50×10^{-2}	17 566 033	1 141 037
B 一方	556	4.71×10^{-2}	15 912 747	749 896
C 一方	163	4.01×10^{-2}	16 027 201	642 472
D 一方	143	4.06×10^{-2}	13 581 370	551 441
AA 対面	8	1.41×10^{-1}	25 696 812	3 634 536
A 対面	62	6.51×10^{-2}	19 224 308	1 251 921
B 対面	131	4.03×10^{-2}	14 904 028	600 139
C 対面	52	3.15×10^{-2}	17 203 914	542 010
D 対面	39	2.68×10^{-2}	17 303 313	463 536

ここで求めるリスクは“統計的火災リスク”であり，式(12)で算出している．

$$R_s = P_t \times I_t \quad (12)$$

ここに，

R_s ：統計的火災リスク（円/年）

P_t ：トンネル火災事故の発生頻度（確率）（件/年）

I_t ：トンネル火災の被害（影響）（円/件）（式(13)）

$$I_t = I_H + I_p + I_s \quad (13)$$

リスクは表-2.22 に示す通り，一方通行では AA 等級の火災事故発生頻度が高いが 1 件あたりの損失額は大きくはない．逆に発生頻度の低い A，B 等級の方が損失額が大きく発生頻度は低い多い傾向である．対面通行では AA，A 等級は相対的に影響額も発生頻度も高い傾向にあり，同ランクの一方通行トンネルよりもリスクが高い傾向にあることが分かる．

第 3 章 高速道路トンネルの潜在的火災リスク評価

3.1 潜在的火災リスク評価

(1) 潜在的火災リスク評価手法

第2章にて、トンネル火災事故データベースを分析し、一連の手順でリスク算定を進めることで、個々のトンネルの有する火災事故発生頻度や損失が推計でき、火災事故リスクの相対比較を可能とした。しかしながら、統計データによるリスクは、評価時点の比較は可能であっても、リスク改善策方法とその効果の評価には、ある程度の観測期間を要することとなる。このため、前節で取りまとめた損失（影響）のうち、「人的損失」算定に際して、火災シミュレーションと被災者の避難行動シミュレーションを連成させた個別トンネルの評価を行い、仮に火災が発生した場合、どの程度の被害となるか推定し、対策の有無による比較を試みた。なお、評価時間に関しては、トンネル火災発生から避難完了までとして10分間と設定している。

(2) シミュレーションによる評価

a) 火災の再現

火災評価のためのシミュレーターに関しては、模型トンネルや実大道路トンネル火災実験データとの定量的な比較から、十分な再現能力が確認され、日本国内の道路トンネル防災システム的设计段階における標準的な評価ツールとして使用されている三次元LESスモゴリンスキーモデル“Fireles”¹²⁾を用い、時々刻々と変化するトンネル内の避難環境データを取得する。なお、本評価では、避難時に熱的影響が大きい火源近傍ではなく、火源から離隔した空間の避難を評価するため、使用する環境データは視距に影響を与える煙濃度としている。火災リスクの被評価トンネルにおいて設定する火災規模に関しては、前出式(6)に示す火災発生頻度と表-2.4の火災規模・生起率を用いたイベントツリーを図-3.1に示すとおり構築した。評価方法は被評価トンネルにおける火災発生頻度に対して、推計火災規模と規模別生起率を用いて平均化を行い、最終的な影響（人的損失）を算出するものである。このため、火災シミュレーションは各火災規模毎に実施し、規模毎のトンネル内煙濃度時刻歴データを取得する。煙濃度に関しては、減光係数： C_s 濃度(m^{-1})として取り扱うこととする¹³⁾。

火災シミュレーションで用いる発熱速度(HRR)変化に関しては、これまでに実施された実験で取得されたものが示されているが、基本的にバス火災がベースとなっており、本研究では図-3.2に示す通り、火災の発展モデルなどで使用されている二次曲線(t^2 モデル)を用い、総発熱速度の60%を対流発熱速度として与えることとした¹³⁾。

【火災発生確率】

【規模別火災発生確率】
火災シミュレーション
実施

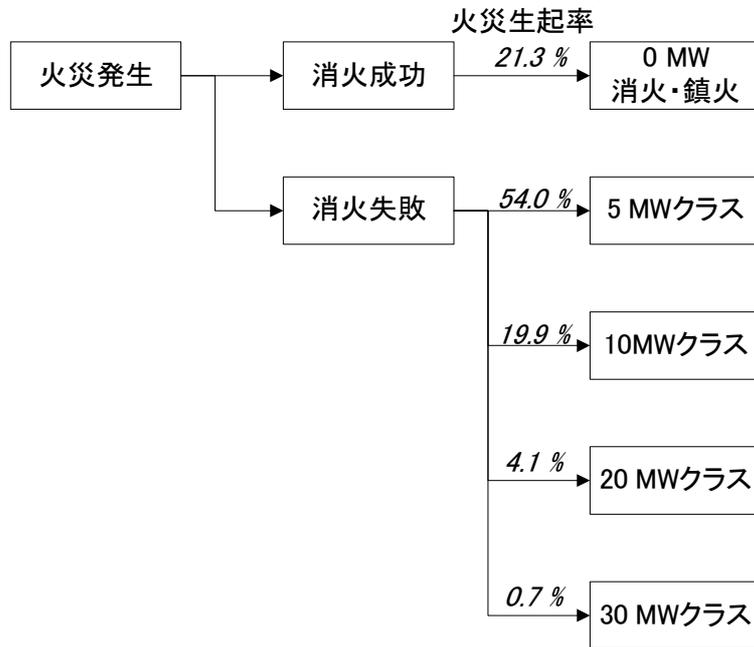


図-3.1 トンネル火災の規模別イベントツリー

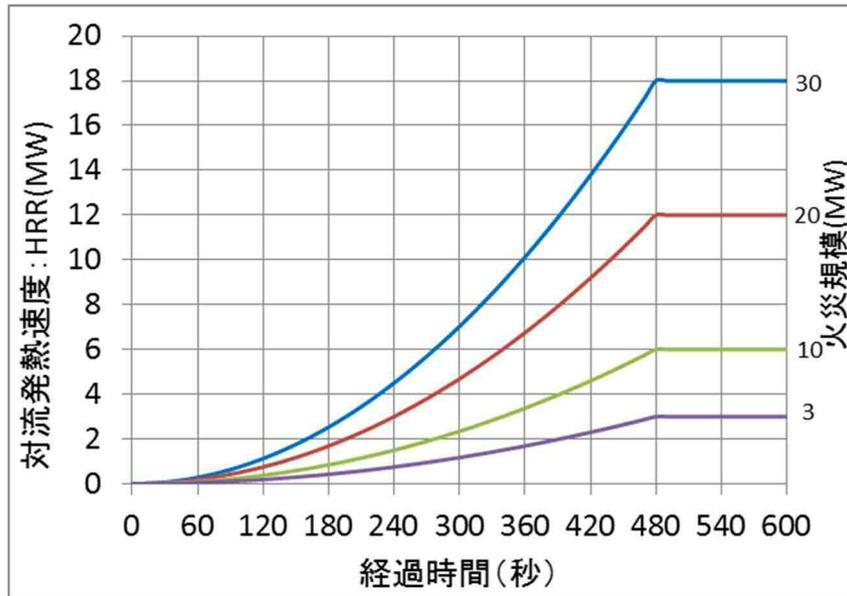


図-3.2 発熱速度曲線

火災シミュレーション実施に際して、設定するトンネル条件は以下の通り。

(トンネル条件)

- ・幾何構造：トンネル延長，勾配，形状・断面積（馬蹄形）（図-3.3）
- ・坑内車両配置：時間交通量，大型車混入率より算定
- ・火災発生個所
- ・格子分割： $dx=0.5\text{m}$, $dy=0.335\text{m}$, $dz=0.318\text{m}$
- ・境界条件：両坑口圧力境界（圧力差 0Pa ）

なお，格子分割数に関しては，可能な限り細かく設定することが望ましいが，多大な計算資源を要してしまうこととなることから，本研究では過去の研究結果¹²⁾を踏まえ，高さ方向が 21 分割以上となる格子分割数を採用している。

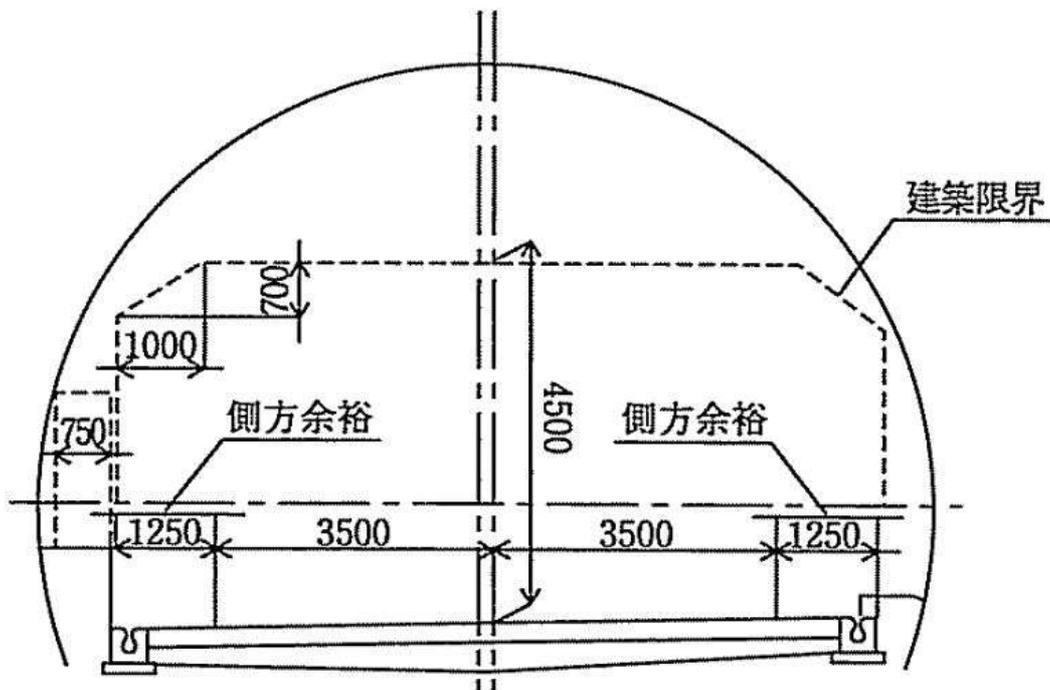


図-3.3 トンネル断面図

b) 煙の移動と評価基準

トンネル内の煙濃度分布に関して、シミュレーション結果から、時間経過とともに火源から坑内に広がっていく状況を危険度マップとして図-3.4 に示す。

延長 1000m, 勾配 3% (図の右上がり), 初期風速 0m/s, 坑口から 500m 地点 (トンネル中央)において 30MW クラスの火災が発生した状況を表しており, 横軸は火点からの距離 (m), 縦軸は火災発生からの経過時間を示している。また, 右表に危険度として, CS 濃度と煙高さの関係を設定している。この時の坑内被災者の避難条件としては, CS 濃度 0.1m^{-1} の煙が路面から 4.0m, つまりトンネル内の照明器具の高さに到達した段階 (図中の青: 危険度 1) で避難を開始し, 避難が困難となり, 行動を停止する条件は高さ 1.5m の位置で CS 濃度が 0.4m^{-1} に達した場合 (図中の緑: 危険度 4) と設定している¹⁴⁾。また, 図-3.5 に火災規模 5 MW, 10MW, 20 MW の場合の危険度マップを示す。火災規模の拡大に伴い, 煙の濃度が高くなり, 坑内の被災者に対して影響が発生する時間, すなわち煙の拡散時間が早くなっていることが確認できる。

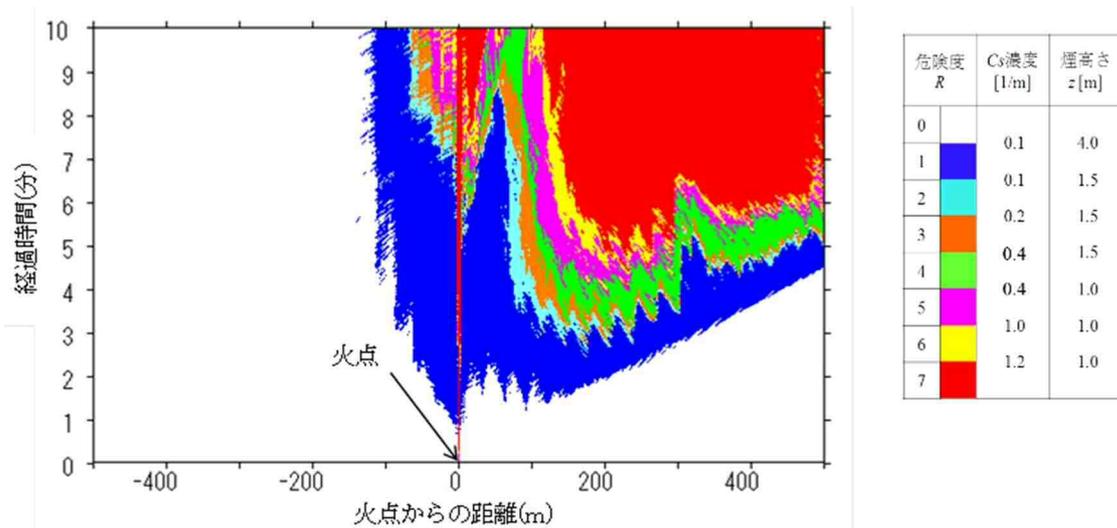
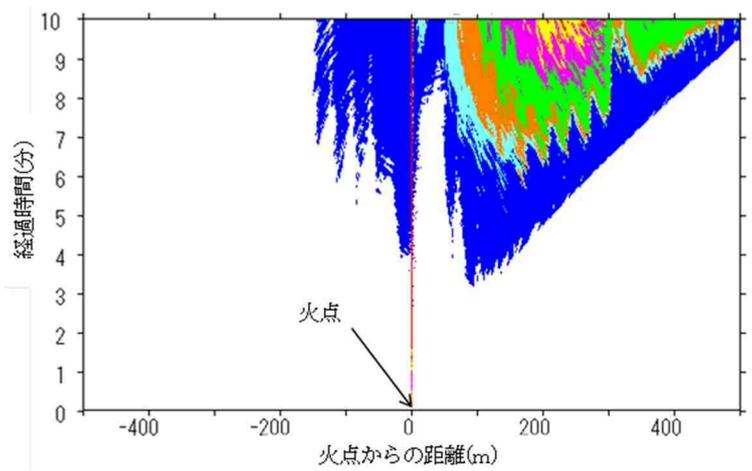
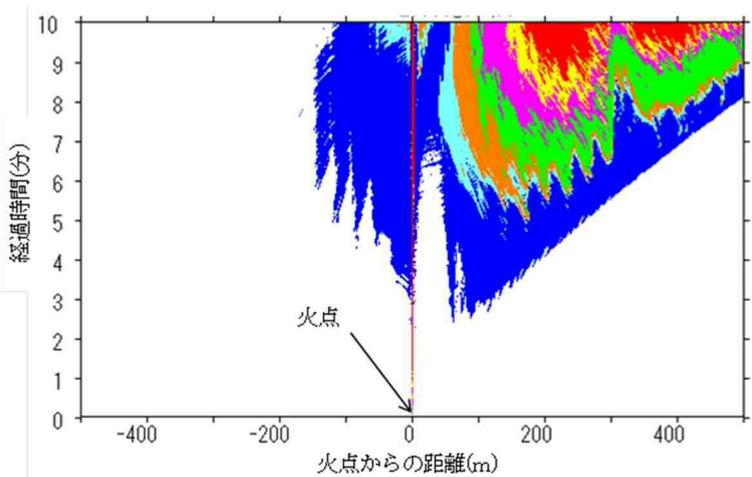


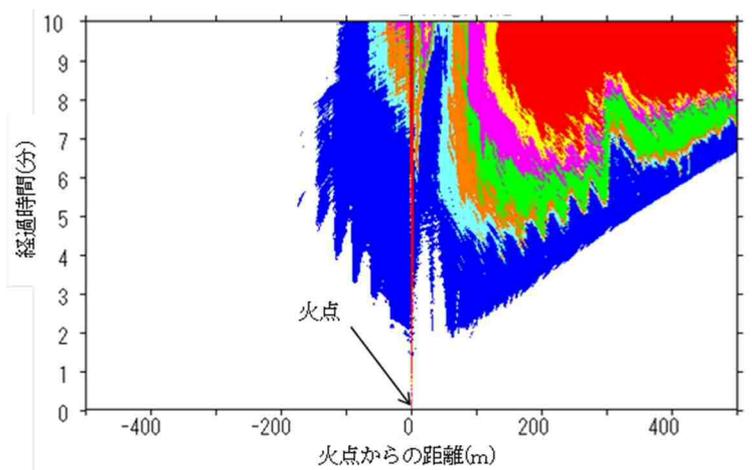
図-3.4 火災発生後の煙の広がり (危険度マップ 30MW)



(a) 火災規模 5MW クラス



(b) 火災規模 10MW クラス



(c) 火災規模 20MW クラス

図-3.5 火災発生後の煙の広がり (危険度マップ)

c) 避難評価方法

避難評価のためのシミュレーターは、トンネル内の被災者に対して行動開始条件、歩行速度、最終避難箇所を与条件として設定し、火災シミュレーションにより取得した煙濃度データとの連成により、歩行/停止条件を設定して評価時間内に避難できなかった被災者数(残留者)を算出するものである。先ず、被災者の行動開始条件に関しては、「頭上を通過する煙を確認して避難開始」、「避難する人を見て避難する」という基本的行動条件のほか、情報提供による避難開始として、非常時の情報収集・提供設備（ラジオ再放送、情報板、拡声放送、CCTV(画像処理)）の組み合わせとして行動開始時間（情報提供開始時間）を仮に設定した。これら行動開始時間と火災イベント推移を図-3.6 に示す。検討ケースは表-3.1 のとおり。

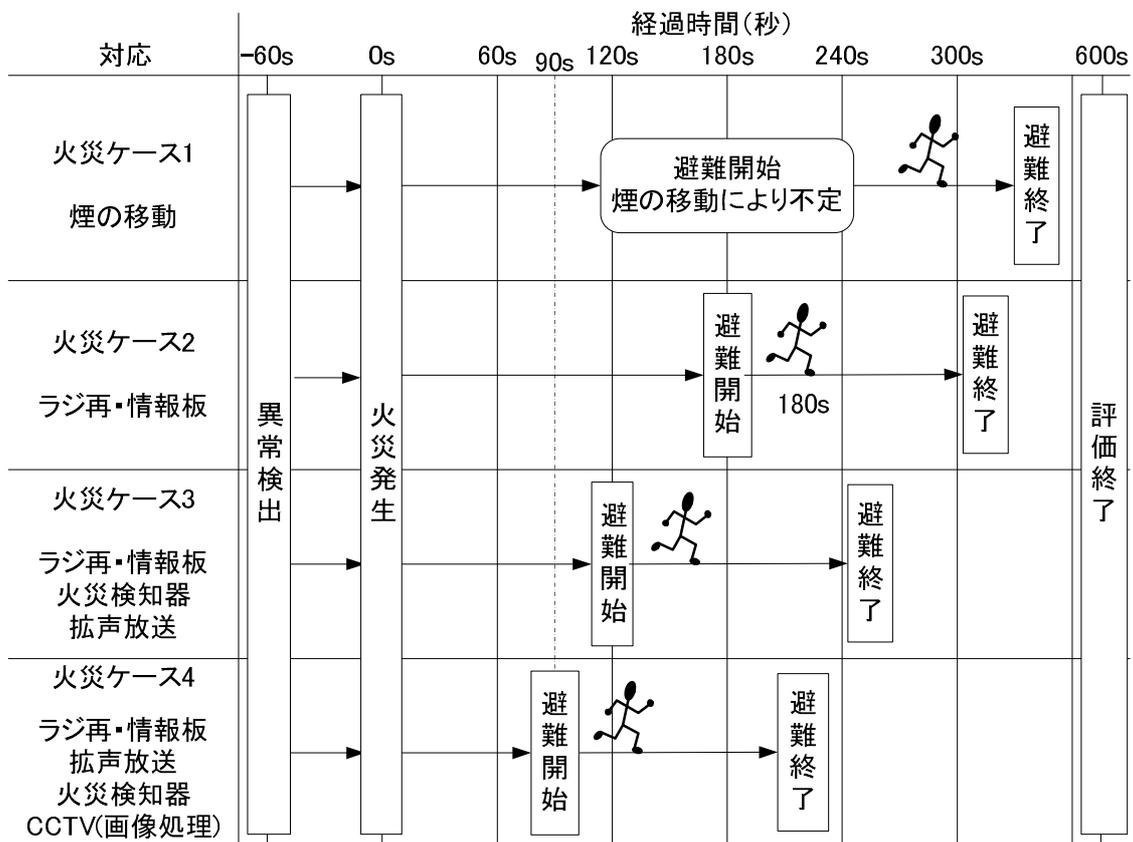


図-3.6 行動開始条件別火災イベント推移

表-3.1 シミュレーション検討ケース

	避難誘導放送				非常口	
	無	有			無	有
避難開始トリガー	煙を見て	180 秒後	120 秒後	90 秒後		
火災ケース 1	○				○	○
火災ケース 2		○			○	○
火災ケース 3			○		○	○
火災ケース 4				○	○	○

次に、火災空間における歩行速度に関しては、CS 濃度に応じた歩行速度が実験で確認されている。本研究では、清家らの研究¹⁴⁾を参考として表-3.2 に示す歩行速度を設定した。70 歳以上の割合を人口割合より 10%と仮定し、「遅い」とした。平均歩行速度が 1.33m/s¹⁵⁾ となるように、「普通」と「早い」を割り振った。なお、避難時の歩行速度に関しては±0.1 m/s の分散を考慮し、残留者人数は避難シミュレーションを 1 000 回実施した結果の平均値を用いることとしている。

最終避難箇所に関してはトンネルの坑口と非常口が考えられるため、非常口が無い場合、坑内に等間隔で設置される場合について避難評価を行うこととする。

表-3.2 避難時の歩行速度

項目	早い	普通	遅い
速度	1.6 m/s	1.3 m/s	1.0 m/s
割合	30 %	60 %	10 %

d) 連成評価の例

火災に伴う煙濃度と坑内移動状況、避難行動との連成評価事例を次節に示す。検討条件として、対面通行延長 1 000m, 勾配 3% (図の右上がり), 交通量は断面で 2 500 台/時間, 大型車混入率 25%, 坑口から 500m 地点(トンネル中央部)において 30MW クラスの火災が発生した状況を想定している。図-3.7~3.9 では、火災シミュレーションにより取得した坑内の煙の濃度分布に対して、被災者の避難行動を連成させたものである。トンネル内の縦断方向(横軸)から伸びている黒実線は被災者の行動を示し、時間経過とともに移動していない場合は時間経過方向(図の上方向)に伸びていくが、避難のために歩行開始した場合、図の斜め上方向に移動していくことが分かる。

3.2 リスク削減効果

(1) リスク改善策組み合わせと効果

リスク改善策として、非常口、情報収集設備、情報提供設備を選定し、その組み合わせと効果について以下に示す。

シミュレーションの条件として、非常口があれば、坑口だけではなく非常口からも避難し、情報収集・提供設備があれば、煙や避難する人を見て避難を開始することに加え、放送などに促されて避難を開始する。

1) 火災ケース1：煙を見て避難（非常口無し）

図-3.7 は頭上を流れる煙を確認して避難開始、避難する人を見て避難開始を前提としているため、火源から離れるに従い、避難行動開始が遅延してしまうこととなる。火源右側の煙が多く流れる方向では、避難を開始しても危険度4（3.1節参照）の煙に包まれてしまい、残留者（行動を止めてしまう被災者）が多数生じていることが確認できる。

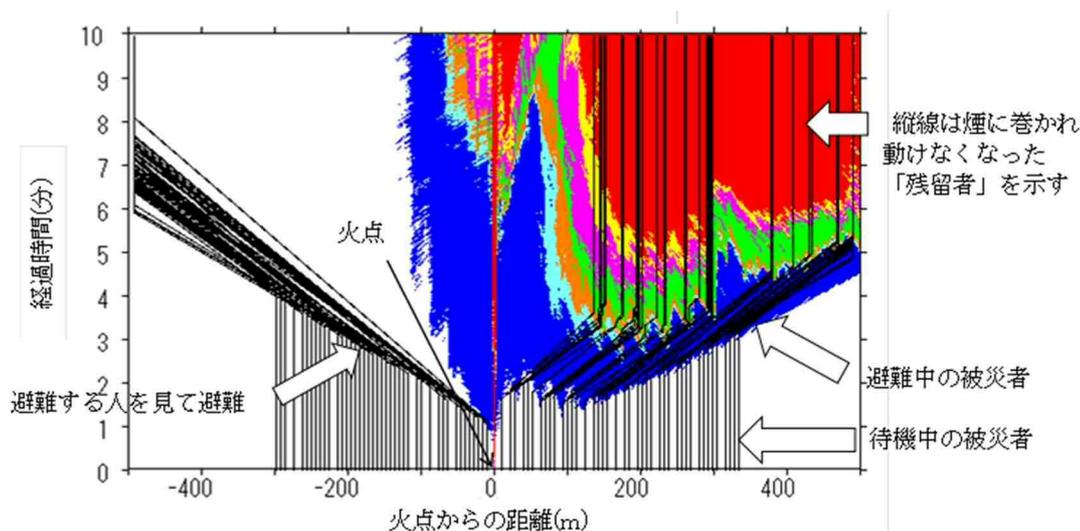


図-3.7 連成評価事例1(煙を見て避難)

2)火災ケース 4：90 秒後避難開始（非常口無し）

図-3.8 は情報収集設備や情報提供設備を充実させた事例（火災ケース 4）を示している．前述のケースより残留者は減少しているものの，数多く生じていることが確認できる．

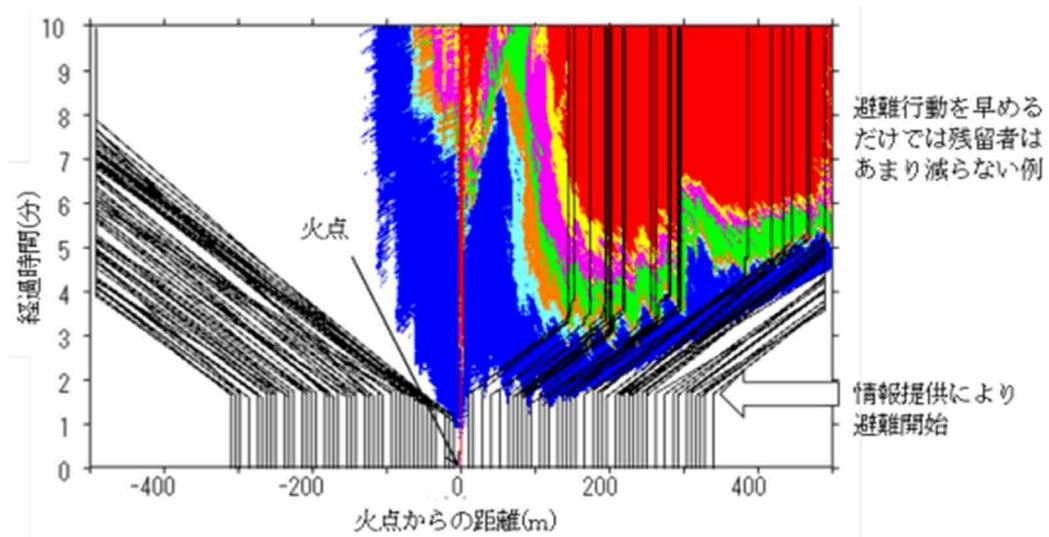


図-3.8 連成評価事例 2(情報提供有り，非常口無し)

3)火災ケース4：90秒後避難開始（非常口有り）

図-3.9は2)火災ケース4に対して、火源から150m地点に非常口があった事例を示している。非常口の設置に伴い坑内の被災者が全員避難することが確認できる。

これら限定的な条件の元、火災-避難シミュレーション連成評価の結果を表-3.3に取りまとめた。避難行動を被災者に委ねる場合(ケース1)、5 MWクラス火災でも残留者が生じ、火災規模に比例して残留者が増加していることが分かる。次に情報収集・提供設備を追加したケース4では残留者が減少しているものの、20MW、30MWクラスの火災では多くの残留者が生じている。このため、ケース4に対して非常口を設置した場合、30MWクラスを除き残留者は生じないことが確認できた。

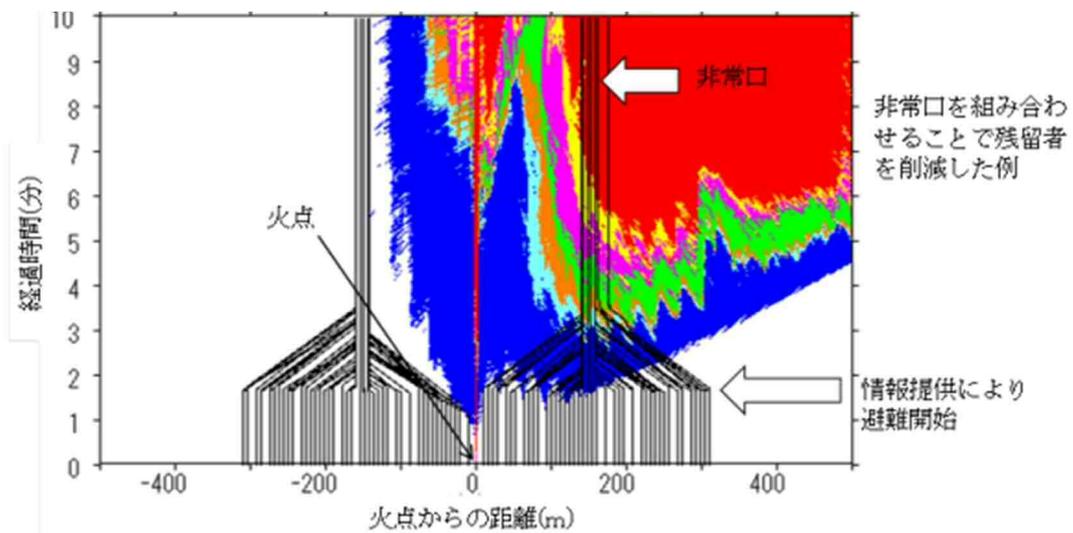


図-3.9 連成評価事例3(情報提供有り，非常口有り)

表-3.3 火災-避難連成評価の結果(残留者の比較)

対応	火災規模			
	5 MW	10 MW	20 MW	30 MW
煙を見て避難 火災ケース1	6.44	6.97	16.15	47.45
情報収集・提供 火災ケース4	0.00	0.17	6.58	34.57
上記+非常口 火災ケース4	0.00	0.00	0.00	1.41

(2) リスクマトリクス作成

2.3 節で示した統計的リスクのマトリクス同様に火災-避難シミュレーションの連成評価により求めた人的損失を元に潜在的リスクのマトリクスを図-3.10 に示す通り作成した。対象トンネルは対面通行，A 等級，延長 1 705m，勾配 1.9%，日交通量 16 500 台，大型車混入率 11%として試算している。その結果，実績から推計する統計的リスクの被害額は約 2 千万円/年に対して，潜在的リスクでは，煙を見て避難するケース 1 では 3 億 6 千万円である。次に，情報提供・収集設備を充実し，避難行動開始を早めたケース 4 では被害額は約 1 億 5 千万円に減少，設備は追加せず，非常口を追加した場合は約 2 千万円に減少し，更に非常口，情報収集・提供設備を設置した事例では統計リスクとほぼ同額の 2 千百万円程度まで減少することが確認できる。

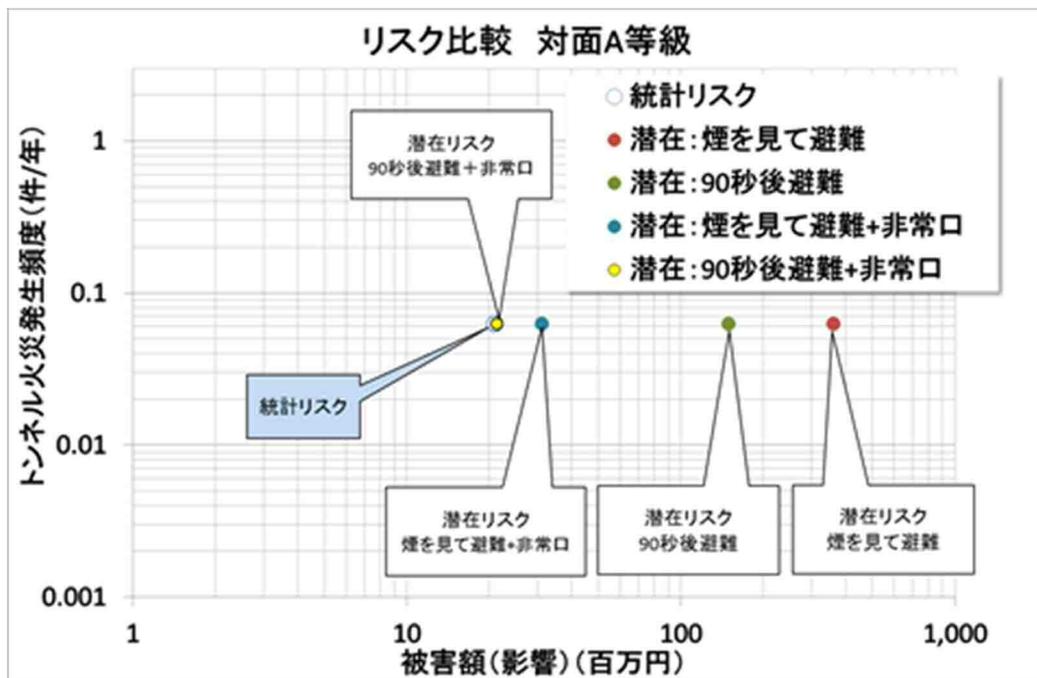


図-3.10 リスク改善策とリスクの変化 (例)

3.3 リスク管理手法

(1) リスク管理の流れ

一般的なリスク管理は、1)リスクの特定と算定、2)リスク評価、3)リスク改善の手順をたどる。本研究では、数多くの供用トンネルに対して、前出の統計的リスク評価を行うことで各トンネルが有するリスクの相対比較が可能となった。しかし、リスク改善のための対策実施に対しては無尽蔵に投資出来るわけではなく、必要なものに対して妥当な投資をすることが求められる。今回作成したリスクマトリクスは、火災事故の発生頻度と被害で構成されていることから、リスクマトリクス上に一定の基準値、すなわち閾値を設定して管理することが合理的であるといえる。このとき、リスクの軽減策としては火災事故発生頻度の低減が考えられるが、対策と具体的軽減効果が現時点では想定できないことから、当面は被害額（避難行動のトリガーとなる情報収集・提供設備の設置、並びに非常口の設置に伴う効果）について検討することとした。

(2) リスク管理基準（閾値）の設定

リスクの管理基準値に関しては、我が国では鉄道分野において検討が先行しており、最近、欧州各国で議論されているリスクの許容水準の考え方について、秋田の論文¹⁶⁾と、道路トンネルのリスク評価に対する現行の方程式⁹⁾を参考に、表-3.4をまとめた。

一方、道路トンネル火災事故に関しては、国内では現在のところ先例が無いが、海外ではオーストリア、チェコ、オランダ、ドイツ、イタリア等で利用可能なリスク許容基準が設定されている⁹⁾。このため表-3.4に示すフランスの水準の考え方の、既存システム（高速道路トンネル火災リスクの現在の管理基準）を維持することを目標とし、リスク評価を行った。なお、参考として、イタリアは多くのトンネルを有しているので、イタリアの基準との比較を試みた。

表-3.4 各国で議論されているリスク管理水準例

国	許容水準例	解 説
イギリス	ALARP (As Low As Reasonably Practicable principle)	【一般的リスク全般】 リスクが実際面で妥当なレベル以下に低減できればよしとする。逆にリスク低減が実際上不可能または安全性向上/コスト比が釣りあわぬ膨大なリスクがリスクが予想される場合、そのシステムは受容されない
フランス	GAME (Globalement Au Moin Equivalent principle)	【一般的リスク全般】 システム全体として既存システムの安全性と同等ならば許容する
ドイツ	MEM (Minimum Endogenous Mortality principle)	【一般的リスク全般】 5～15 歳の子供の内在的死亡率の 5%以下に相当するリスク水準以下であれば許容する。許容水準は 10^{-5} /人/年
オーストリア	モデルトンネル RVS の分類	【道路トンネルリスク】 トンネルリスクモデル (TuRisMo) を使い、2つの方法が用いられる。 ・モデルトンネル (理想のトンネル) との比較 ・調査トンネルの期待値の絶対量をガイドライン RVS にしたがって分類
チェコ	避難可能時間	【道路トンネルリスク】 CAPITA 法を使い、トンネル利用者が避難できる大まかな時間を算出し、システムの貢献度を判定する。
オランダ	決められたトンネル利用者に対するリスクの受け入れ基準	【道路トンネルリスク】 RWS-QRA モデルを使い、リスクを評価し、受け入れ基準 (個々のリスクは人-キロ毎に $1.0 \cdot 10^{-7}$, 社会的リスクは年及びキロ毎に $1.0 \cdot 10^{-1}/N^2$) と比較
フランス	評価の相対比較	【道路トンネルリスク】 事象の頻度に対する定量的な事前評価を行い、標準化された頻度-影響度マトリックスを用いてランク付けする。さまざまなトンネルに対して事前評価を行い比較する。
ドイツ	損傷頻度線図の許容性の範囲	【道路トンネルリスク】 2つのシナリオ (衝突事故と危険物を巻き込まない火災) のイベントツリー解析によりリスクを測定
イタリア	ARARP (合理的で実行可能な最低水準) ¹⁷⁾	【道路トンネルリスク】 リスク分析法 (IRAM) により F-N 曲線を算定し、ARARP 領域 (許容可能なレベルと受容不可能なレベルの範囲) と比較する

(3) 閾値によるリスク評価

高速道路トンネル火災に関しては、前述の表-2.6 や図-2.9, 2.10, 2.12 示す通り、一方通行よりも対面通行の方がリスクが高いことが示唆されたことから、管理水準（閾値）については一方通行の最大リスク，並びに統計リスク全体の平均リスクについて算出し，参考までイタリアの ALARP 基準の範囲（上限： 10^{-1} （人/年），下限： 10^{-4} （人/年））に関しても，前出の図-2.12 に追記したものを図-2.23 に示す．なお，図の一方最大の線は，統計的手法で算定された一方通行トンネルのリスクのうちの最大値を通過する線を示している．

図-3.11 を見ると，統計的リスクの平均値を上回るトンネルは全体の 1/3 程度（549 本）あるが，一方通行最大リスクを上回るトンネルはわずか 2 本に絞られることが確認できる．これらは参考まで記載したイタリア ALARP の範囲内であることがわかる．また，図-3.12 は，特定のトンネルに対する潜在的リスクの評価結果に対して，閾値を記載したものである．統計的リスクとあわせて表示することで，潜在的リスクの具体的な削減策と定量的な削減効果の可視化が可能となり，施策決定のための資料として活用が期待できることが分かった．参考ではあるが，当該トンネルの潜在的リスクに関しては，我国同様に数多くのトンネルを有するイタリア ALARP 基準の範囲内であることが確認できた．

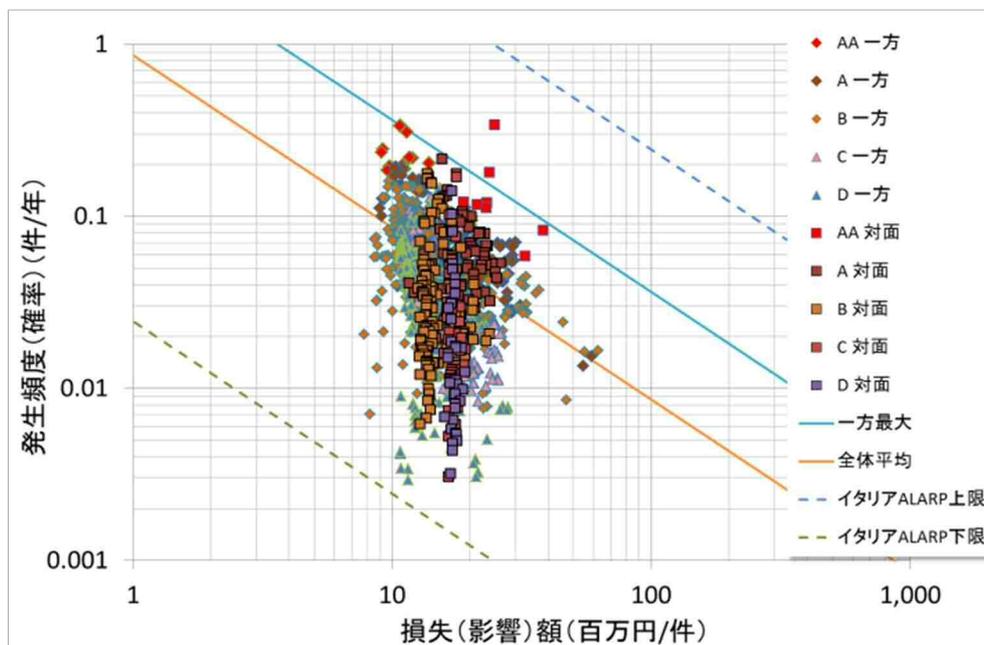


図-3.11 統計的リスクと閾値の例

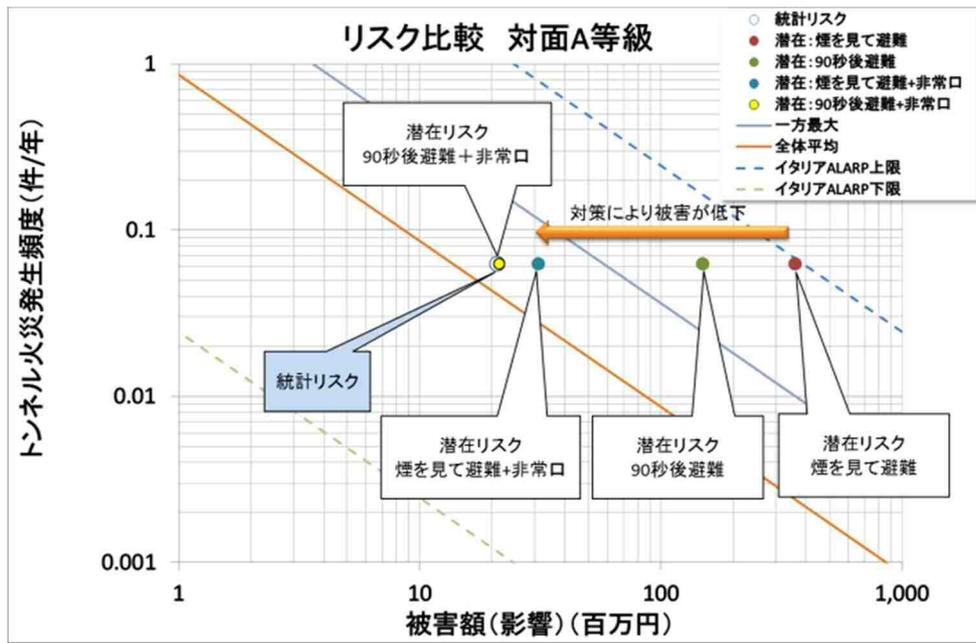


図-3.12 潜在的リスクと閾値の例

3.4 得られた知見

高速道路トンネルの火災事故データに基づく統計的リスクアナリシス手法を考案し、以下の知見を得た。

- 1) トンネル火災出火車両の割合は乗用車と貨物系車両がほぼ同じ割合であるが、出火原因は車両故障が 7 割、交通事故に伴うものが 3 割であり、交通事故は単独と複数が各々 1/2 であった
- 2) 火災事故データより火災規模推計を試みたところ、30MW クラスの火災は殆ど発生していないことが分かった
- 3) 近年、供用延長が増加傾向にある対面通行トンネルは火災発生頻度は低いものの、ひとたび発生すると被害（影響）は大きい傾向である

次に、統計的リスク評価手法について検討を行い以下の成果を得た。

- 1) トンネル火災事故データベースの分析を行い、火災事故発生確率の推計モデル式を提案し、火災事故要因となるパラメータを限定的な条件のもと明らかにした
- 2) トンネル火災事故データベースに記録された被害状況から、トンネル火災発生に伴う被害額を人的、物的、社会的に分類し、各々算定する手法を提案した
- 3) 上記 1), 2)からトンネル火災事故リスクの定量的な比較（相対比較）が可能となった

統計的リスクでは評価できないリスク改善対策について、火災シミュレーション、避難シミュレーションを連成させた潜在的リスク評価から以下の成果を得た。

- 1) 具体的なリスク改善効果の可視化を可能とし、非常用施設設置によるリスク改善効果を定量的に把握することが可能
- 2) 最もトンネル火災事故リスク改善に効果的な対策は非常口の設置である
- 3) 閾値の設定により、計画的なリスク改善施策の裏付け資料として活用が期待できる
- 4) 日本の高速道路トンネルのリスク値について、参考までにイタリアの ALARP 基準と比較したところ、すべて範囲内にあることがわかった

第4章 潜在的リスクの効果的な削減策の検討 (避難行動と改善方法)

4.1 トンネル火災の認識

昭和54年7月11日（水）午後6時37分、東名高速下り線日本坂トンネルにて、犠牲者7名、負傷者2名を出す大規模なトンネル火災が発生（表-4.1）したことは、中高年の方なら周知の事実である。その後数多くの安全キャンペーンが展開され、トンネル火災の恐ろしさが周知された。トンネル非常用施設に関する基準の改定もされた。しかしながら、その後においても、昭和63年の中国道境トンネルでの火災（表-4.2）など、大きな被害を出したトンネル火災は発生したが、一般のドライバーの記憶にはあまり残っていない印象を受ける。トンネル火災は恐ろしいものという印象が薄れてきていないかという疑問が湧いてくる。

表-4.1 日本坂トンネル火災

日付	場所	概要	備考
昭和54年7月11日（水） 午後6時37分	東名（下り） 日本坂トンネル 出口手前400m	犠牲者7名、負傷者2名。 大型貨物車4台、普通乗用車2台の事故。 173台焼失（後続車両167台）。	・非常用施設設置基準を変更 ・信号機設置 ・キャンペーン

表-4.2 日本坂トンネル火災以降の被害の大きかったトンネル火災事例

日付	場所	概要	燃焼時間
昭和63年7月15日	中国道 境トンネル	犠牲者5名、負傷者5名。 大型貨物車5台、普通貨物車3台（クレーン付トラック1台）及び普通乗用車2台の衝突事故が発生し、11台中9台焼失1台一部焼失。	3時間5分
平成2年8月16日	中国道 冠山トンネル	犠牲者1名、負傷者4名。 揮発性溶剤を積んだトラックと車両の正面衝突。2台焼失。	1時間
平成2年9月17日	中国道 境トンネル	犠牲者1名、負傷者2名。 4tトラックが単独で横転。渋滞で停車中の普通乗用車に大型貨物車が追突、玉突き多重事故。普通乗用車1台と大型貨物車2台が焼失。更に大型貨物車が追突。	1時間40分
平成12年3月4日	山陽道 郷分トンネル	犠牲者1名、負傷者27名。 普通貨物車が停止し、後続車（バス3台、大型貨物車4台、普通貨物車5台、その他35台）が続々と衝突。大型貨物車と普通乗用車の2台が炎上。	2時間
平成12年5月8日	九州道 加久藤トンネル	犠牲者1名。 普通乗用車が出火し、反対車線の普通乗用車に接触、普通貨物車と正面衝突。	1時間
平成16年8月7日	山陽道 高山トンネル	犠牲者5名、負傷者22名。 普通乗用車3台に大型貨物車が追突。大型貨物車1台と普通乗用車2台が炎上。	4時間

4.2 近年のトンネル火災事故事例の分析

(1) 火災時の坑内状況

トンネル内で火災が発生した場合、煙が遡上、降下し、有害ガスや視界不良で避難が困難な環境となる¹⁸⁾ことは周知のところではあるが、それ以前に、濃い煙がトンネル内照明の高さまで降りてきた段階で、照明が遮られ、真っ暗な状態となる。このような状況になった時点で、明りを持たなければ避難が困難な状況となっている。図-4.1に清水第三トンネルの火災実験¹⁹⁾の様子を示す。

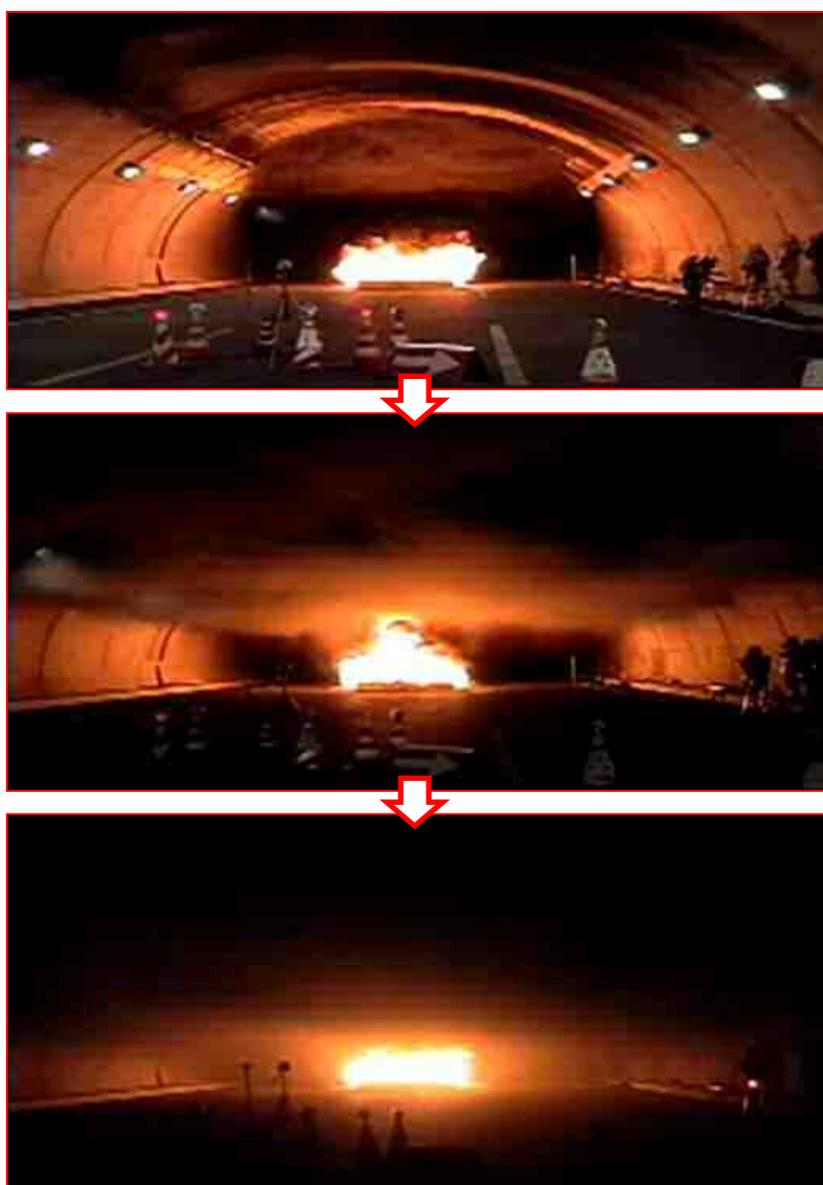


図-4.1 煙による照明の阻害

実際のトンネルで火災に遭遇した場合、図-4.1のような状況となり、視界不良により歩行が困難となる可能性があるため、一刻も早く避難行動を開始しなければならない。煙が充満してしまっからの対応としては、足元誘導灯（後述）の設置や、排煙制御なども考えられるが、まずは、トンネル利用者に、煙によってトンネル内が真っ暗となることを知ってもらい、早く行動を起こすことが大切だと学んでもらうことが重要だと考える。

(2) 推奨する避難行動の例

上下線分離構造の場合、1 500mを超えるトンネルには、避難連絡坑（非常口）が設置されている。仮に上り線で火災が起きた場合、非常口を使い煙がこない下り線へ速やかに避難すれば安全は確保される（図-4.2）。この時下り線は、坑口のD型情報板の「進入禁止、火災」、坑内のE型情報板の「火災とまれ」表示により、車両の通行がないことを前提としている。

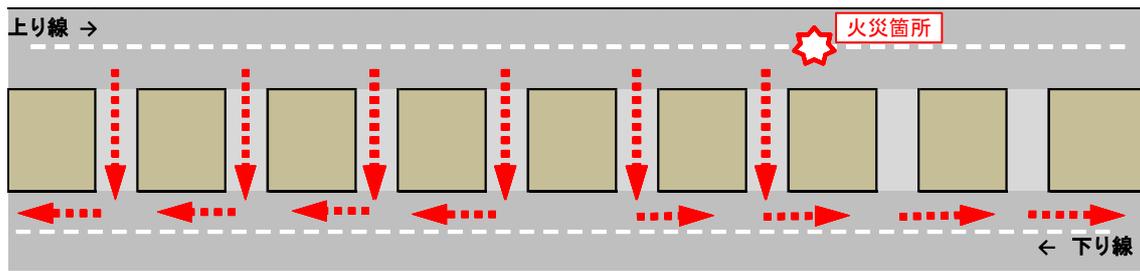


図-4.2 推奨する避難行動のイメージ

(3) 避難行動の検証

a) 避難行動の実態（報道記事より）

過去の火災事故での実際の避難行動の例について、報道内容²⁰⁾から整理したものを下記に示す（図-4.3）。例に示すトンネルは、上下線分離構造で延長1 500mを超え、上下線をつなぐ避難連絡坑（非常口）が設置されている。

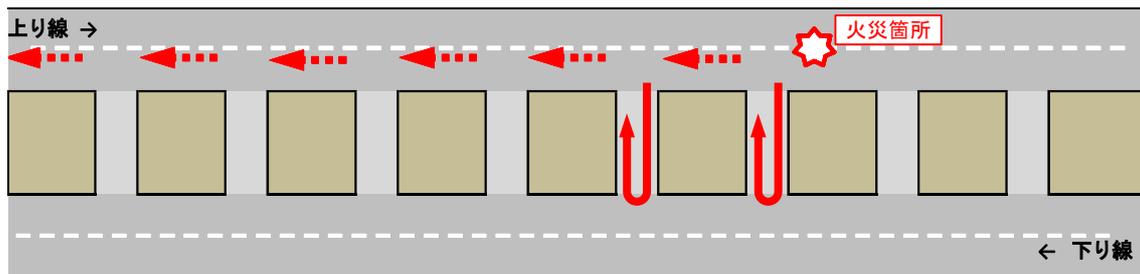


図-4.3 実際の避難行動（報道より整理）

- ・避難連絡坑で上り線から避難してきた被災者は、下り線に車が走っている状態では、怖くて逃げられないと判断して再び上り線へ戻り、3km先の坑口まで上り線を避難したとコメントしている。
- ・ある避難者は、煙が充満する中をUターンやバックする車両があり、接触しそうで怖かったとコメントしている。
- ・映像から判断する限り、煙を危険だと認識せず、坑内や車内にとどまる人が多数いた。
- ・バスのドライバーが、煙で視界がほぼなくなる状況になるまで、車内にとどまっていたとの記載もあった。

b) 被災者の安全行動（報道記事からの抜粋）

被災者の1人が、火災車両に近づいてくる人に対し、車を端に寄せ早く逃げるように促しながら避難したとコメントしている。この行動は、道路中央部に緊急車両通過スペースを確保するために、大きく貢献したとも考えられる（写真-4.1）。



写真-4.1 坑内の状況

なお、海外の事例ではあるが、台湾の雪山トンネルの火災（2012. 5. 7）²¹⁾は、大型バス2台が絡む事故であったが、各バスの運転手の指示のもと、乗客計51名が速やかに避難した。台湾では、雪山トンネルを利用する高速バスを対象に運転手を教育する制度があり、消火器の設置、非常ドアの作動、乗客への非常時の対処方法の説明などが義務づけられているという。

c) 避難事例調査から見つかった課題

近年のトンネル火災における避難事例を調査してみたところ、表-4.2 の郷分トンネルや高山トンネル、表-4.4（後述）の諏訪第一トンネルの事例のように、避難者が煙にまかれて負傷しているケースがみうけられる。前述の具体的な避難事例も踏まえ、火災時の避難行動を分析してみると、以下の課題が見つかった。

- ・坑内に煙が充満してきても逃げようとしない。
- ・坑内で火災が発生していても、坑口や途中で停車せずに、構わず坑内へ進入する。
- ・火災地点の横を通過または、火災地点ぎりぎりに停車する。
- ・煙が充満する中、バックやUターンをして坑外へ出ようとする。
- ・非常口が設置されていても、使わず坑口へ避難する。

このような状況では、逃げ遅れや被災者の増加により被害が拡大したり、煙の充満したトンネルに進入してきたり U ターンをした車両と避難者が接触するなどの二次被害の発生が懸念される。

(4) 避難者の心理

なぜ坑内に煙が充満しても逃げないかを，これまでの事例調査と専門家へのヒアリングにて検証した。

a) 事例調査（韓国テグ地下鉄火災）

平成 15 年 2 月 18 日，韓国テグ市地下鉄一号線中央路駅坑内の列車の 1 両目から出火．犠牲者 192 名，負傷者 148 名の大惨事となった²²⁾．この時，車両内に煙が充満しているにも関わらず，誰も立ち上がらないため，誰も逃げなかったといわれている（写真-4.2）．



写真-4.2 火災時のテグ地下鉄内の状況

この理由は，「正常性バイアス」が働き，まだ大丈夫だと過信して，地下鉄車内にとどまったからだといわれている．「正常性バイアス」とは，なるべく危険を感じまいとする意識が働いて，周りの人が避難しないので，自分も避難しなくても大丈夫だと思ってしまうこと．

b) 専門家ヒアリング（片田敏孝教授：群馬大学）

原因は、「正常化の偏見」「認知的不協和」である。

- ・人の普通の行動は、1番目の情報は「正常化の偏見」のため無視する。そして2番目の情報を待ち、結果逃げ遅れる。
- ・危険だとわかっているが行動に移らない状況「認知的不協和」が気持ちよくなないので、逃げないことを正当化する。避難するよりも、避難しないことを正当化の方が簡単で、周りが逃げないから、以前も大丈夫だったからなどの理由をつければよい。

このような心理状態にあるため、人は分かっているにもかかわらず避難行動を起こさない。はじめに行動に移すことは非常に勇気が必要であり、いかに動機づけるかが重要な課題と考える。このような状況を打開する啓発が必要である。

(5) 被害の拡大

火災の発生しているトンネルへ進入してしまうとどのような状況となるか，事例より検証する．表-4.1 の日本坂トンネルの事例では，後続の 167 台もの車両が延焼している（写真-4.3）²³⁾．これらは坑口で停止するか，十分な車間距離をとって停車していれば，これほどの被害にはならなかったと想像できる．



写真-4.3 日本坂トンネル火災の延焼車両

(6) 二次被害の発生

煙の充満する坑内への進入や、坑内での U ターンは、非常に危険な行為となり、車両が避難者と接触するなどの二次被害につながることもある。表-4.3 に過去の事例を紹介する。煙の充満する坑内への進入は、自己を危険にさすだけでなく、二次被害の発生原因となりうる。

表-4.3 二次被害の事例

日付	場所	概要	備考
昭和63年7月15日	中国道 境トンネル	犠牲者5名。	・当初5名は焼死とみられていたが、その後の調査で3名が事故死と判定された。 ・火災直後に進入してきた車両にはねられている。

4.3 啓発活動の課題

(1) これまでの啓発活動と課題

過去に公開された啓発のための資料を調べてみると，下記のような特徴があり，この傾向は最近のホームページ等での啓発においても変わらない．現在課題に挙げている，早期避難開始，坑口進入防止，坑内進入・Uターン禁止などの内容は，ほぼ伝えられていない．

- ・ 事故を起こさないための注意（速度，車間距離，割り込み，わき見，路肩走行）が目立つ．
- ・ 非常用設備（消火器，消火栓など）の紹介と使い方が中心．
- ・ 火災の怖さや煙の危険性についての記述は皆無．
- ・ 文章が多く，読むために労力を要する．

これらの啓発活動がどの程度道路利用者に浸透しているか，以前にアンケート調査を行った（図-4.4）．「自信を持って他人に教えられる非常用施設・設備は？」という問いに対し，非常口は 29%，避難誘導灯は 10%しか認識されていないとの結果であった．

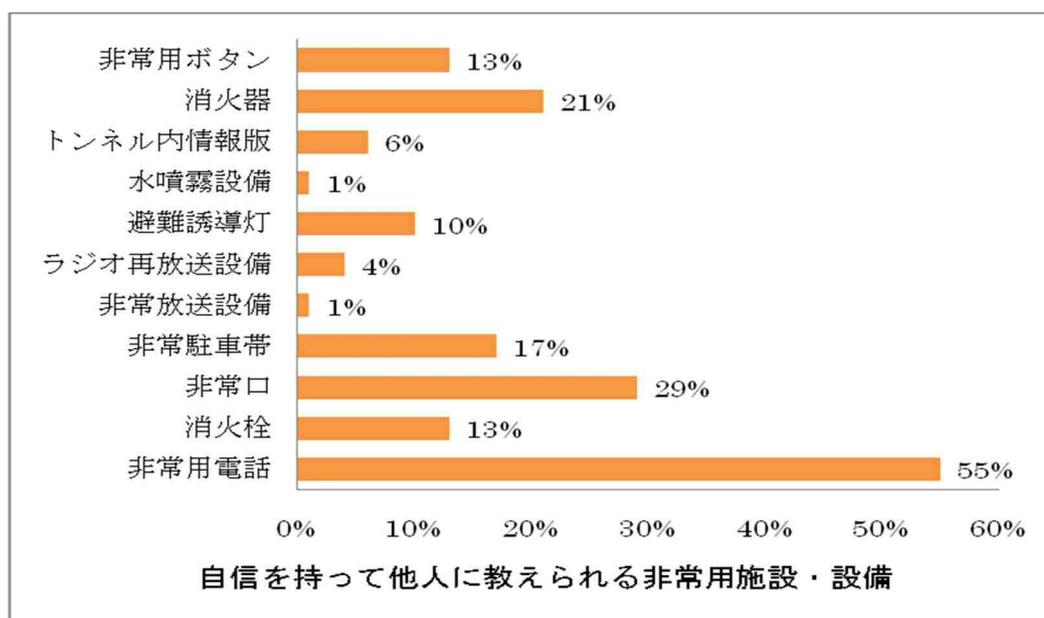


図-4.4 Web アンケート（2006年 NEXCO-RI 調べ） n = 2 775

最近の火災事例からも、啓発の効果が現れていないと言わざるを得ない事故があった（表-4.4）。この事例は、勾配の比較的緩い1 000m程度のトンネルの入口部約300m区間で発生し、18人もの避難者が煙を吸った。火災の規模（乗用車1台全焼）もそれほど大きくなく、煙の遡上速度もそれほど速くなく（坑内はほぼ無風だった）、避難距離もそれほど長くはないことから考えれば、避難者が長時間火災車両付近にとどまっていたと推測される。

表-4.4 最近の火災事例

日付	場所	概要	備考
平成27年4月11日	常磐道 諏訪第一トンネル	負傷者18名(搬送15名)。 普通乗用車1台焼失。	<ul style="list-style-type: none"> ・延長1090m, 下り勾配1%。 ・入口から約300m地点の火災。 ・後続車両に乗っていた4～84歳の男女18人が煙を吸い込み, 15人が搬送された。

4.4 効果的な啓発

(1) 考えられる効果的な啓発活動

a) 啓発用資料の作り方

これまでの事例の分析などから、下記のような資料が効果的と考える。

- ・火災の怖さや煙の危険性を明確に記載する。
- ・感性に訴えるような、簡潔でインパクトのある見栄えとする。
- ・設備の説明ではなく、とにかく早く避難行動を起こすよう促す内容とする。

b) 啓発戦略

これまでの事例の分析などから、下記のような啓発戦略が有効だと考える。

① 難リーダー（率先避難者）の育成

釜石の軌跡の立役者とされる片田教授のヒアリングにおいても、市内の小中学生の 99.8%を助けた秘訣は、日ごろから「率先避難者たれ」といつてきたことだという。最初に逃げることは勇気のいることであるが、誰かがにげればみんな続いて避難することは、これまでの事例からも伺える。そのため、バスやトラックのプロドライバーの協力を得るため、協会の講習会での講義などが有効だと考えられる。

② 啓発資料の内容の照査

これまでの啓発資料では、効果が薄かったといわざるを得ない状況であるため、改めて啓発資料の内容を見直す必要がある。これまで、一般ドライバーの立場で、広報誌を作りこんできた JAF に協力を求めたところ、煙の挙動などは、おそらく一般ドライバーは知識がないので、きちんと情報をだしてあげれば、トンネル火災の危険性を認識するはずではないかとの意見を得た。この意見を踏まえ、トンネル火災の怖さを前面に押し出し、早期避難へつなげるシナリオが有効だと考える。現在実施されている啓発（広報）を整理分析し、高速道路関係者と協力して啓発活動を実施していかなければ、効果は上がらないと思われる。

③ 高速道路関係者への問題意識の共有

一般ドライバーへ「トンネル火災の怖さ」を浸透させていくためには、まずは、高速道路関係者の意識を高めていく必要があると思われる。気持ちのこもった説得力のある説明をするためには、内部で問題意識を共有することが重要と考える。近年問題視された、トンネル覆工のはく落対策や、二重の安全対策など、安全に対する取り組みは、内部の意思統一がなされ、一丸となって取り組んでいるところであるが、トンネル火災についてはこれらに比べ不足していると言わざるを得ない。大規模火災は必ず起こるという前提で、リスクマネジメントを行うべきである。小規模な火災は、高速道路全体で、年間 16 件程度起きており、漸増傾向に

ある。大規模火災が起こり、被害が発生してしまうと、大きな社会的問題となりかねない。できることから順次対応していくべき課題であり、意識の共有が重要である。

4.5 新たな取り組み

今後、トンネル火災が起こった場合に被害を最小限に抑えるための取り組みとして、啓発により避難者のとるべき行動を認知させ、増強した非常用施設を100%活用して避難するというを計画的に実施していくことになるが、費用的な面などから長期的な取り組みとなることが予想される。大規模火災はいつ起こるかわからないため、できることから取り組んでいくべきと考え、新たな取り組みを検討した。この取り組みは、これまでの実際の避難行動や避難者の知識、認識を踏まえたうえで、できるだけ効果的で、取り組み易いものということで、提案したものである。

4.6 非常口の強調

(1) 非常口強調表示板と非常時強調灯

非常口強調表示板とは、非常口の両脇に大きな表示をすることで、非常口を認識しやすくするものである。非常時にわかりやすくなることはもちろんだが、普段通過する際にも、「ここに非常口がある」「トンネルには非常口がある」ということを、ドライバーに認識（学習）してもらうことも考えている。トンネル火災の際の避難で重要なことは、避難距離をできるだけ短くし、早い段階で安全なところに到達することであり、非常口を 100%活用することは、非常に大きな効果がある。

以下に非常口強調表示板の導入に至るまでの検討内容を示す。

a) ドライバーの認識

図-4.4 のとおり、Web アンケートによる非常用施設認識調査（NEXCO 総研）の結果、問「自信を持って他人に教えられる非常用施設・設備は」に対し、非常口は約 3 割、避難誘導灯は約 1 割しかはつきり認識されていない。つまり、非常口の存在を知らず、避難方向もわからないドライバーが大半を占めている状況といえる。この結果から、いくら非常口を設置しても、ドライバーに認識されていないため、非常時に使われない可能性があることが示唆された。

b) 対策のポイント

下記の事例より、非常用設備のあり方を考える。なお、避難連絡坑は、非常口と同じ意味として記載されている。

【事例-1】

1 500mのトンネル

- ・トンネル等級 A 避難連絡坑 1ヶ所
- ・大型トラックがパンクし出火
- ・運転手が煙を吸引し負傷
- ・後続車両の 40 人が煙の充満するトンネル内を 800m 徒歩避難

【事例-2】

1 400mのトンネル

- ・トンネル等級 A 避難連絡坑 1ヶ所
- ・パンク修理中の乗用車にトラックが追突し炎上
- ・煙を吸引し 22 名負傷
- ・トンネル内に煙が充満し多数の車が立ち往生

- これら事例からいえることは、
- ・NEXCO 要領どおり設備が設置されていてもうまく活用できていない（非常口を使っていない）。
 - ・避難開始が遅く（どう行動すべきかを知らない/車内を安全と考え外に出ない/煙が危険だという認識がない），煙が充満した後でようやく行動を起こしている。いかに早く安全な場所へ避難するかが被害を最小限に抑えるポイントとなる。

c) 非常口強調表示板，非常時強調灯の検討

写真-4.4 は，供用前のトンネルに非常口強調表示板と非常時強調灯を設置し，見え方を検証した時のものである。煙で基本照明が隠されつつある状況においても，非常口強調表示板と非常時強調灯を低い位置に設置することで，認識できるイメージを持つことができる。



写真-4.4 非常口の強調

◎対策案：非常口の強調

《仕様》

- ・内装タイルに焼付けた非常口強調表示板
- ・非常時に点灯点滅する非常時強調灯

※仕様は，模型での一次選考後，金谷トンネルで実大実験を行い，NEXCO 関係者，一般利用者，有識者にアンケートをとり決定した。

《効果》

- ・表示が目につくため，日ごろから非常口の存在や位置を認識できる（非常口を利用するようになる）。
- ・非常口の位置がわかりやすいため，迷うことなく避難できる（遠い坑口より近

い非常口へ）。

- ・非常時強調灯が直観的に危険を感じさせ，車外へ出ることを促す（避難初動が早くなる）。
- ・煙が充満し基本照明が隠れてしまっても，低い位置についた非常時強調灯を頼りに避難可能（煙は時間とともに降下してくる）。

実際に設置した状況は**写真-4.5** のとおり。図-4.5 のように，煙が降下して照明を隠してしまった時の非常時強調灯の見え方のイメージは**写真-4.6** のとおり。



写真-4.5 非常口の強調

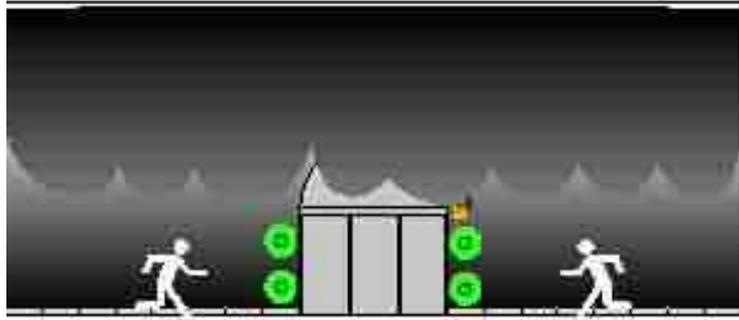


図-4.5 煙降下時のイメージ



写真-4.6 非常時強調灯の見え方（イメージ）

4.7 煙の中での避難

(1) 足元誘導灯の検討経緯

トンネル火災では、煙は時間とともに遡上し降下する。そのため、いかに早く安全な場所（非常口、坑口）まで避難するかが重要となる。つまり、非常口があり認識されていれば、被害を最小限に抑えることができる。

NEXCOでは、一方通行は750m間隔、対面通行のAA級及び3000m以上のトンネルは350m間隔で非常口が設置されている。非常口のあるトンネルは今回提案のように非常口を認識させることが重要である。対面通行で非常口がないトンネルは非常口の設置を検討すべきであり、設置まではそれに代わる対応を検討する必要がある。そこでここでは足元誘導灯を提案し、導入検討を行った。

a) 足元誘導灯，音声誘導とは

トンネル火災時に発生した煙が、避難行動を妨げる要因として、視覚的困難、精神的困難、身体的困難などが考えられる。4.2節でも述べたが、これら要因のなかで、はじめに問題となるのが、発生した煙により、照明が遮られ、真っ暗闇となり、視界不良により、右も左も分からなくなる視覚的困難である。足元誘導灯は、視覚的困難を緩和する役割があり、煙の充満したトンネル内においても、被災者を非常口などの安全な場所まで導く効果が期待できると考えている。足元誘導灯は、すでに欧州各国において、多くのトンネルにて導入がすすんでいる。足元誘導灯のイメージは図-4.6のとおり。

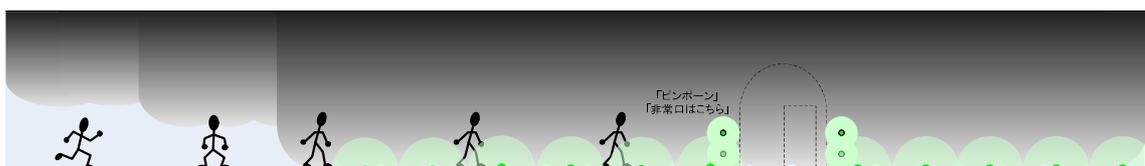


図-4.6 足元誘導灯のイメージ

写真-4.7，写真-4.8は、平成25年度に、国総研の実大トンネルにて実施した実験（NEXCO総研トンネル研究室）の状況である。写真-4.8は、煙により照明が遮られた状況を再現したものであるが、視覚的困難な状況においても、足元誘導灯の点滅は認識することができた。



写真-4.7 足元誘導灯設置状況



写真-4.8 煙中での足元誘導灯点灯状況

b) 足元誘導灯 (+音声誘導) の効果検証

図-4.7は、平成25年度の実大トンネルによる実験により得られた、足元誘導灯と音声誘導（非常口の位置を音声にて避難者に知らせるもの）の定量的効果を示している。縦軸の歩行平均速度は、被験者15人のものであり、横軸のCs平均濃度は、減光式煙濃度計と疑似煙の相性が悪かったため、低い数値となっているが、体感的にはかなりの視界不良を再現できていた（これについては、再度実験を行い、補正をすることを考えている）。

「誘導灯無」の場合は、煙で照明が遮られた状況を再現したもので、歩行平均速度は1.0m/s以下となっている。被験者の中には、非常口までたどり着けなかった方もいた。「誘導灯有」の場合は、同様に煙で照明が遮られた状況を再現したうえで、足元誘導灯を点滅させ、非常口へ誘導したもので、歩行平均速度が1.6m/sを超えている。「音声+誘導灯」の場合は、足元誘導灯を点滅させた上に、音声により非常口の場所を認識させる誘導を追加したもので、「誘導灯有」に比べ、さらに歩行平均速度が向上している。

以上の結果から、足元誘導灯 (+音声誘導) の効果は期待できるものだと考えられる。今後更なる実験を行い、効果の明確化を図る計画である。

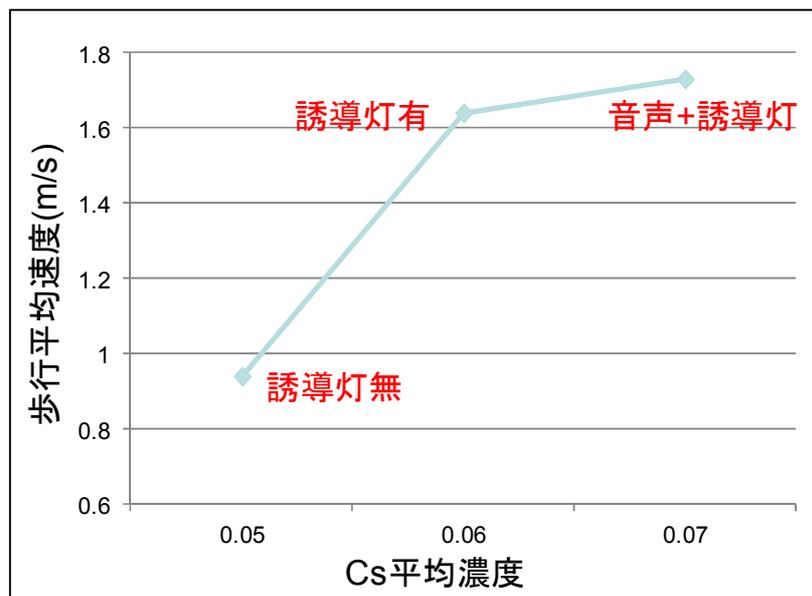


図-4.7 足元誘導灯 (+音声誘導) の効果

第 5 章 結論

5.1 本研究のまとめ

第1章では、日本の高速道路トンネルの現状と、海外のトンネル火災に対する安全性向上の取り組み状況を整理し、日本の高速道路トンネルの安全性をさらに高める必要性と、安全性を高めるために解決していかなければならない現実的な問題（労働力、予算、期間など）への対応方法などについて述べた。

第2章、第3章では、現状の高速道路トンネルの安全性を向上させる優先順位付けと、安全性を向上させる対策案を選定することのできる仕組みとして、潜在的火災リスク評価手法を提案した。すでに起こったトンネル火災事例の統計データを分析し、統計的火災リスク評価手法を提案し、今後起こるであろうトンネル火災と避難行動をシミュレーション手法で再現し、潜在的火災リスク評価手法を提案した。それらを組み合わせ、高速道路トンネル火災リスクアナリシス手法を構築した。この手法により、これから起こるであろう大規模トンネル火災への対策手法と対策すべきトンネルの洗い出しが可能となり、計画的にトンネルの安全設備の増強を検討することができるようになった。

第4章では、トンネル火災に対するこれまでの啓発手法を振り返り、トンネル火災での避難行動の実態を整理し、これまでの啓発は効果があがっていなかったことを認識した。そのうえで、より効果的な啓発とはなにかについて、避難行動の事例から再検討し、今後の啓発のあるべき姿について提案した。効果的な啓発とは、まず第一に火災の怖さや煙の危険性を明確にすることとまとめ、啓発戦略も提案した。非常用施設の増強や啓発の浸透にはまだまだ時間を要するため、まずはできることから対策すべきとして、非常口の強調と、足元誘導灯について紹介した。非常口の強調（非常口強調表示板、非常時強調灯）は、トンネル火災などの非常時に非常口の場所が認識しやすいだけでなく、通常のトンネル利用時においても、ここに非常口がある、トンネルには非常口があるということを認識する、啓発的な効果もある。足元誘導灯は、煙が降下してきて避難環境が悪化することに着目し、トンネル基本照明が煙で隠されて真っ暗になっても、さらには煙が人の高さまで降下してきた状況になっても、避難行動を停止することがないように、避難をサポートする設備として紹介した。

最後に総括として、次のようにまとめる。トンネル火災時の被害拡大を防ぐ方法は、非常用施設の増強などのハード的対策と、啓発などのソフト的対策がある。非常口（避難坑）設置は極めて有効な手段となるが、大きな投資を伴う。CCTVなどの非常用施設の増強も有効であるが、時間と労力を要する。非常口強調表示板、非常時強調灯、足元誘導灯、音声ビーコンなどの新たな設備は、欧州などでの設置実績も多く、煙による視界不良時でも避難行動がとれるという点で、有効な手段だと思われるが、導入に向けた方針決定が必要となる。どのような対応が効果的で効率的かについて、議論するためのツールとして、トンネル火災リスクアナリシス手法を構築し、対策手法や対策優先度について、議論をしているとこ

ろである。

上記ハード的対応に比べ、啓発は、費用がかからず、すぐにでも実践できるものもある。また、トンネル非常用施設の適正な活用を促し、リスクアナリシスの想定通りの避難行動の実施につなげるためにも、啓発の効果が期待されている。本研究において、過去の事例や有識者の意見などから、これまでの啓発を再検討し、より効果的な啓発手法を提案した。これをもとに、より安全なトンネルを目指して、ドライバーの意識改革を行うべきである。それには、まずは高速道路関係者内の意思統一が必要不可欠であり、さらなる安全を目指し、一丸となって取り組むべきと考える。

これら、トンネル非常用施設の増強と啓発活動の適正化を合わせて進めることが、トンネルの安全性を向上させることにつながると考える。その検討手段の一つとして、今回提案のトンネル火災リスクアナリシス手法が活用されるように、今後とも研究を続けていきたいと考える。

5.2 今後の課題と展望

今回の研究にあたり、多くのデータベースを整理したが、今回提案したリスクアナリシス手法の精度を上げていくためには、もっと多くのパラメータが必要となる。今後はデータベースの解像度を向上させ、リスクに影響のあるパラメータの抽出を図り、評価手法の精緻化を進め、効果的なリスク改善策の検討や導入等を図りたいと考えている。

今回提案したリスク評価手法は、まだまだ試作段階であり、本格導入にはいたっていない。まずは、この評価手法を基準に盛り込み、高速道路トンネルの安全性を向上する仕組みを構築する必要がある。このリスクアナリシス手法を導入し、リスク低減対象となるトンネルを選別し、具体的な対応（リスクを低減させる対策の実施）につなげ、安全性が向上したトンネルを増やしていきたい。今後必ず起こるであろう大規模トンネル火災に備え、ひとりの負傷者、犠牲者も出さないような対応が事前にできるように、仕組みの周知と一般ドライバーへの啓発など、積極的な活動を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 鮫島利隆, 赤井公昭, 山田憲夫 : 日本坂トンネル火災事故の復旧工事, 土木学会誌, Vol.65, No.4, pp.7-17, 1980.4.
- 2) M Mettelini, L Glarey, L Di Noia : THE NEW MONT BLANC TUNNEL-A MILESTONE IN TUNNEL SAFETY, New Technology in Tunnel Management Systems, 4-6 December 2001, Basel, Switzerland.
- 3) http://www.landroverclub.net/Club/HTML/Travel_TauerTunnel.htm
- 4) <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1723406.stm>
- 5) 小坂寛 : モンブラントンネル火災の教訓, 高速道路と自動車, Vol.42, No.9, pp.36-40, 1999.
- 6) Directive 2004/54/EC of European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network, Official Journal of the European Union, L167 of 30 April 2004.
- 7) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株) : 設計要領第三集トンネル編 (4) トンネル非常用施設, 2013.7.
- 8) Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 05.05.B, PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999.
- 9) Current Practice for Risk Evaluation for Road Tunnels 2012 PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation.
- 10) 内閣府政策統括官 (共生社会政策担当) : 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究, pp.18-64, 2012.3.
- 11) 道路投資の評価に関する指針検討委員会, 道路投資の評価に関する指針 (案) 第 2 編, 2000.1.
- 12) 川端信義, 王謙, 佐々木啓彰, 内藤祐輔 : トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, 第 65 巻, 第 634 号, pp.1870-1877.
- 13) 菊本智樹, 川端信義, 丸山大輔, 山田眞久 : 乗用車用小型道路トンネル内における火災時の熱気流挙動特性, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.4, pp.448-459, 2007.
- 14) 清家美帆, 川端信義, 長谷川雅人 : 煙流動 CFD を用いた避難行動シミュレーションによる道路トンネル火災安全性の評価方法, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.70, No.1, pp.1-12, 2014.
- 15) (社) 日本建築学会 : 安全計画 I 安全計画の視点, pp.26, 1981.10.10.
- 16) 秋田雄志 : 鉄道の安全性・信頼性を新たな視点で考える, 第 16 回鉄道総研講演会, pp.9-14, 2003.
- 17) Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali, ANAS S.p.A. Direzione Centrale Progettazione, pp. 53, Novembre 2006.
- 18) 石原, 茂久 : <総説> 火災時の煙と有害ガス, 木材研究・資料, 1981, 16, 49-62
- 19) 竹國一也, 下田哲史 : 第二東名高速道路清水第三トンネルにおける火災実験, 高速道

- 路と自動車, Vol.44, No.6, pp.30-35, 2001年6月.
- 20) 近代消防社：近代消防, No.626, 2013.3.
 - 21) 交通部国道高速公路局：雪山隧道南下 26K 交通事故火燒車事件検討報告（初稿）2013年.
 - 22) 失敗知識データベース-失敗百選, 大邱の地下鉄火災, 2003年2月18日, 國島正彦ほか, <http://shippai.js.go.jp>.
 - 23) 日本道路公団, 日本坂トンネル技術対策検討委員会：日本坂トンネル技術対策検討委員会報告書, 資-45, 1980.7.

謝辞

私が本格的にトンネルを“天職”としたきっかけは、二十世紀最後の難工事といわれた、東海北陸自動車道飛騨トンネルの施工に携わったことです。そこでは日々驚かされることの連続で、次々に生じる問題事項に対し、どのように対応するか、多くの技術者が集まって知恵を出し合っていました。私もその一端にふれ、多くのことを学びました。トンネルは奥が深い、もっと知識をつけなければ、せつかくの経験が無駄になってしまうと考え、(株)高速道路総合技術研究所のトンネル研究室へ行き、さらなる研究をつづけました。そこでは、トンネル付属施設（非常用施設、換気施設）などの研究をさせていただき、また新しい発見の連続となりました。トンネル付属施設は一般の方にも関係が深いもので、大きな役割をもっています。なかでも非常用施設は、道路利用者の命に係わるものなので、極めて重要であり、よりよくしていくためには多くの議論が必要となります。そのような中で、トンネル火災避難をテーマに研究をさせていただきました。地震や津波など自然災害に比べ、トンネル火災は、道路管理者の取り組みで、被害を低減しやすいと考えましたので、トンネル火災避難を研究することは非常に意義深いものでした。

研究を進める中で、中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株)の横田博士と金沢大学大学院の川端教授に出会いました。横田さんは、トンネル建設屋であった私をトンネル非常用施設屋にしてくれました。広い視野で多くの情報を与えてくれました。感謝しきれないほど、私を育てていただきました。川端先生には、トンネル火災について一から教えていただきました。その後、トンネル火災研究会に入り、日本消防検定協会の栗岡博士、(株)エコプランの山田博士、坂口代表、菊本博士、首都高速道路株式会社の三瓶博士、パシフィックコンサルタンツ(株)の江本さん、金沢大学の清家博士ら、トンネル火災について多くの知識を持った方々と出会い、勉強させていただきました。多くの支援をいただきました。

本研究をまとめるにあたり、川端先生、横田さん、トンネル火災研究会の方々をはじめ、多くの方々のご支援、ご助言をいただき、完成させることができました。本当にありがとうございました。また、家事や家族サービスより研究を優先させてくれた家族や親戚に感謝するとともに、これから挽回すべく努力することを約束します。

この研究が、これからの道路トンネルの安全性向上に少しでも寄与し、大規模トンネル火災の際にも、負傷者、犠牲者ゼロを達成することができれば、非常にうれしく思います。今後とも、リスクアナリシスの仕組みのさらなる精緻化に励んでいきますので、ご指導よろしく願いいたします。