博　士　論　文

題名　延長の短い道路トンネルにおける火災発生時の排煙の

有効性に関する研究

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　1223122015
氏　　名　三瓶　靖弘
主任指導教員　川端　信義教授
提出年月　平成 27 年 6 月

目次

１．序論

１．１　道路トンネルの換気

道路トンネルは自動車から排出されるガスや巻き上げ粉じん等が籠りやすい構造物である．このため，トンネル利用者に対し生理的な悪影響を与える場合や視環境の悪化を引き起こす場合などが想定されることからトンネル内の換気を行う必要がある．

道路トンネルの換気方式には自然換気方式と機械換気方式がある．自然換気方式は自然風や両坑口における気圧差及びトンネル内外の温度差に起因する圧力差，また，走行する自動車によるピストン効果による圧力差（交通換気力）などによりトンネル内の空気が移動し，内部のガスや粉じんが希釈または入れ替えられる方式である．この方式は気象条件や交通条件に依存するため流れに不安定な要素が多いため，交通量の少ないトンネルなどに採用されている．

機械換気方式は軸流送風機やジェットファンなどの換気機により強制的に空気を移動させる方式である．この方式には複数の方式があり，トンネルの構造や形状，周辺の環境，や経済性など総合的な観点から選定することが多い．以下に各換気方式の概要を示す．

１．１．１　縦流換気方式

縦流換気方式はトンネル内の空気を自動車の走行方向と同方向に空気を移動させる方式であり，トンネルを一つのダクトとして空気の流れをとらえる手法である．一般的に，トンネル以外の構造物は必要としないこと，交通換気力を利用するなどして換気機の規模を抑えられることから，イニシャルコストやランニングコストの抑制には効果的な手法である．ただし，重交通である場合はトンネルの途中で空気の入れ替えが必要となるため，適用可能なトンネル延長に限りがあるとされている．図 - 1 に縦流換気方式におけるトンネル内の空気の流れを示す．

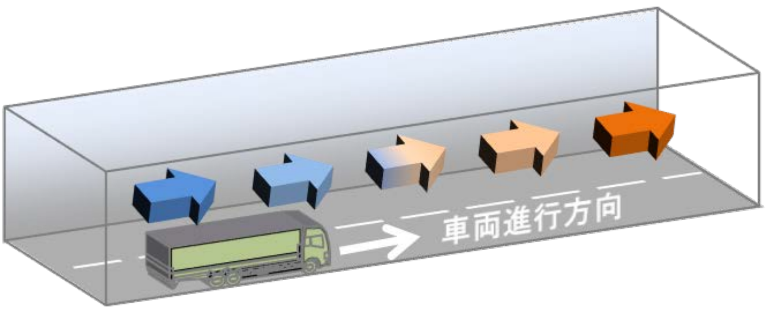


図 - 1　縦流換気方式　イメージ図

（ａ）ジェットファン縦流換気方式

本方式は図 - 2 に示すような換気機（ジェットファン）をトンネルの天井部に設置し，同装置の噴流効果による昇圧力を利用し換気を行う方式である．車道内の圧力は一般的に入口坑口側が負となり，ジェットファンが設置されている箇所で徐々に昇圧され出口坑口にて圧力が 0 となる．

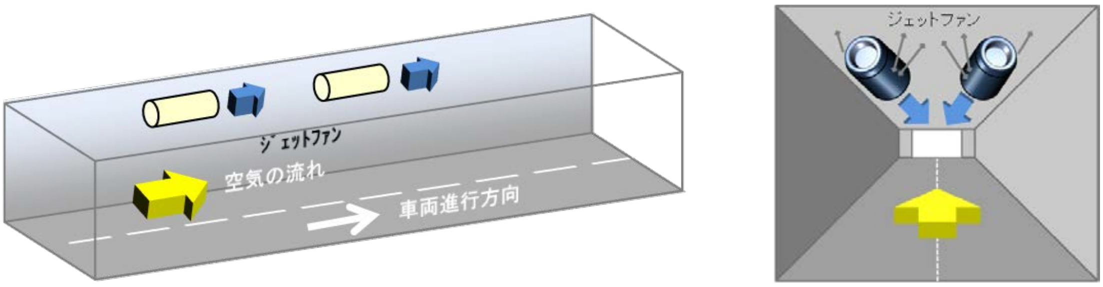


図 - 2　ジェットファン縦流換気方式　模式図

（ｂ）サッカルド縦流換気方式

図 - 3 にサッカルド縦流換気方式における空気の流れを示す．本方式は，トンネル内に設置されたノズルから軸流送風機などの換気機により噴流を発生させ，昇圧力を利用し換気を行う方式である．車道内の圧力は入口側坑口が負，ノズルが設置されている箇所で正圧にとし，出口坑口に向かい圧力は減少し坑口にて 0 となる．

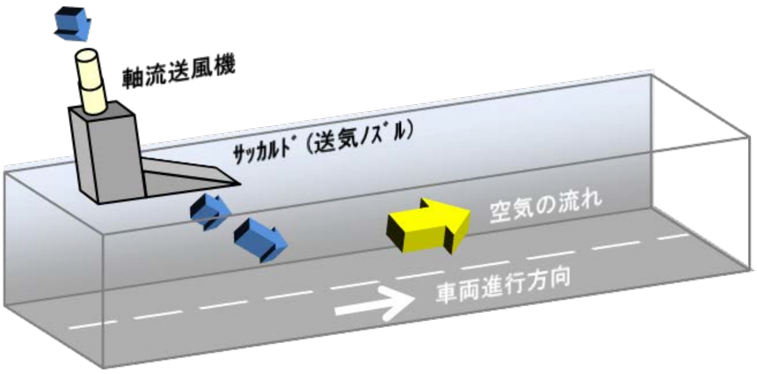
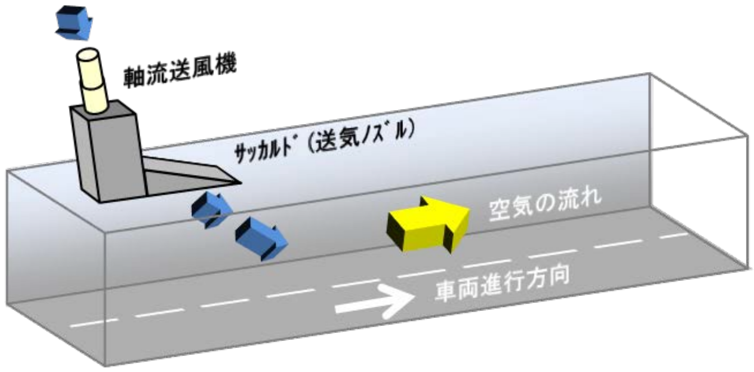


図 - 3　サッカルド縦流換気方式　模式図

（ｃ）集中排気縦流換気方式

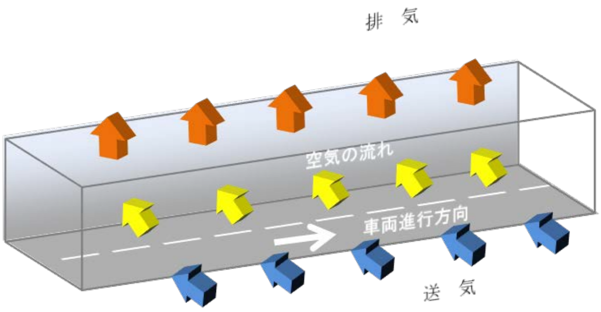
本方式はトンネル内に排気口を設置しトンネル内の空気を集中的に排出する方式であり，排出時に効率的に汚染物質の除去が可能であることから，トンネル外部の環境を考慮する必要があるケースにも用いられる方式である．車道内の圧力は入口坑口で 0 とし，集中排気口の地点で最大負圧, 出口坑口にて圧力が 0 となるように設計することが一般的である．図 - 4 に集中排気縦流換気方式での空気の流れを示す．

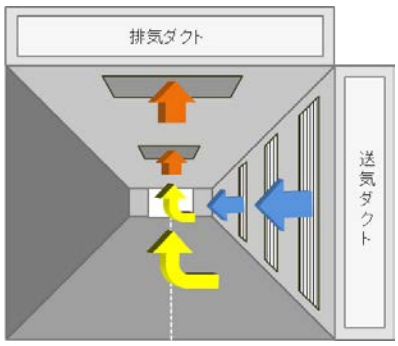


図－4　集中排気縦流換気方式　模式図

１．１．２　横流換気方式

本方式は自動車の走行方向に沿って 2 本のダクトを設置し，一方のダクトからは送気，もう一方のダクトから排気を行う方式である．空気の流れは自動車の走行方向に対し直交し横断する方向に流れる．このため，任意の区間長でトンネル内の換気が完結することから換気区間長に制限は無く各区間での換気量も適宜設定可能である．ただし，トンネル以外にダクト部分の構造物や軸流送風機などが必要となることから，前述の縦流換気方式に比べるとコストは増加する傾向となる．図－5 に本方式におけるトンネル内の空気の流れを示す．





図－5　横流換気方式　イメージ図

１．１．３　半横流換気方式

半横流換気方式は自動車の走行方向に沿って設置されたダクトから軸流送風機等を用い空気をトンネル内に送気もしくは排気させ換気を行う方式であり，縦流換気方式及び横流換気方式の間に位置する換気方式である．

（ａ）送気半横流換気方式

図 - 6 は送気半横流換気方式におけるトンネル内の空気の流れを示したものである．この方式は前述のダクトからトンネル内に空気を送気し，トンネル坑口から外部へ排出する方式である．車道内の圧力はトンネル中央付近が最大正圧となり，入口及び出口坑口に向かい圧力が減少し坑口付近にて 0 となる．

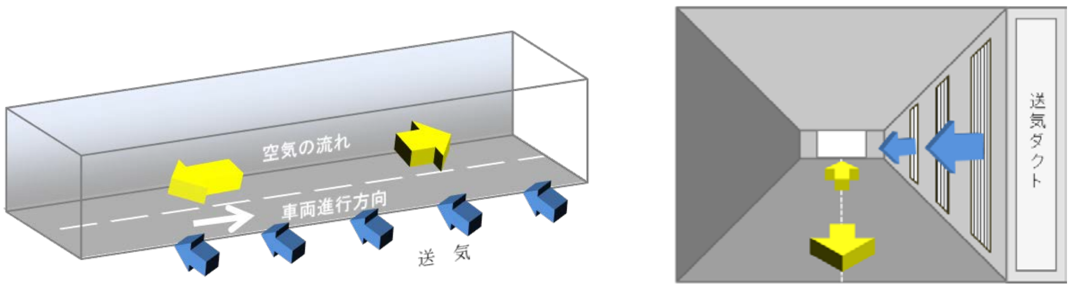


図 - 6　送気半横流換気方式　模式図

（ｂ）排気半横流換気方式

本方式はダクトよりトンネル内の空気を吸引し，トンネル坑口から新鮮空気を取り入れる方式である．車道内の圧力はトンネル中央付近が最大負圧，入口及び出口坑口に向かい圧力が増加し坑口付近にて 0 となる．図 - 7 に本方式における空気の流れを示す．

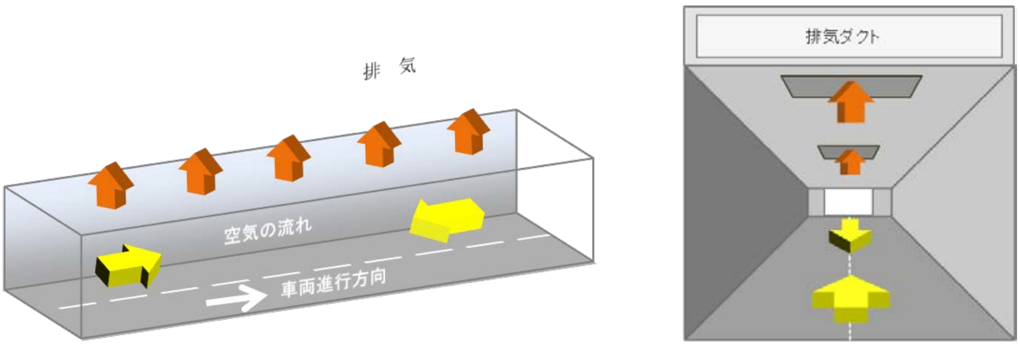


図 - 7　排気半横流換気方式　模式図

１．１．４　組合せ換気方式

実際のトンネルで換気計画を行う場合，区間により交通条件や構造物形状，外部の立地条件などが変わる場合がある．このため，諸条件に応じて前掲の各種換気方式を適宜組み合わせトンネル内の環境を確保するケースも多い．以下に代表的な例を示す．

（ａ）横流換気方式＋集中排気縦流換気方式

本方式は重交通量でトンネル内の換気量が多く，また，トンネル外部の環境にも配慮するケースなどに用いられる．図 - 8 は本方式における空気の流れの模式図である．

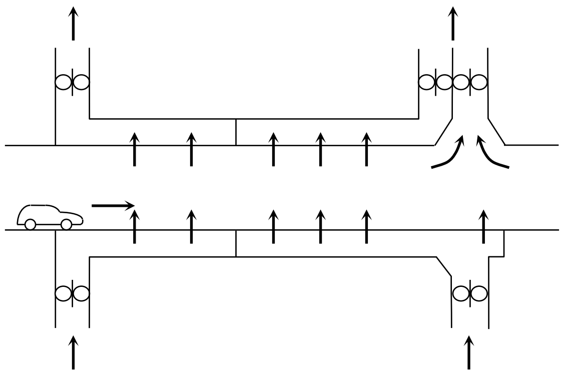


図 - 8　横流換気方式＋集中排気縦流換気方式　模式図
（首都高速道路株式会社：機械設備設計要領［トンネル換気設備編］[1)]）

（ｂ）サッカルド縦流換気方式＋集中排気縦流換気方式

本方式はトンネルの高さ方向に制限があるなどジェットファンの設置が困難であり，また，換気用ダクトの設置が困難であるトンネルなどに用いられる．集中排気縦流換気方式を加えることで外部環境への配慮はもちろん，サッカルド方式との組合せによる制御性の高さから採用されている事例がある．図 - 9 は本方式における空気の流れの模式図である．

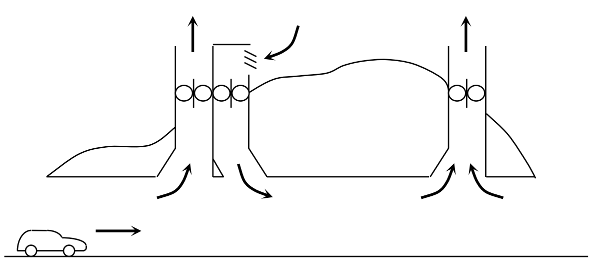


図 - 9　サッカルド縦流換気方式＋集中排気縦流換気方式　模式図
（首都高速道路株式会社：機械設備設計要領［トンネル換気設備編］[1)]）

このように道路トンネルではトンネル内の環境を維持するために種々の換気方式が存在しており，各々のトンネルの条件により最適な方式が採用されている．

１．２　道路トンネルにおける排煙

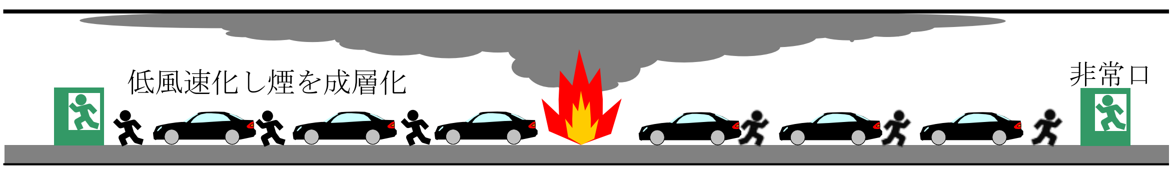
道路トンネルは閉鎖された空間であるため，自動車火災が発生するとトンネル利用者は大きな危険にさらされる．このため，火災の発生を通報する設備や火災を消火する設備，トンネル利用者が安全空間に避難するための非常口や避難通路，誘導標識などが設置されている．トンネル換気施設（以降，「換気施設」という）の設置されているトンネルでは換気機を適切に運転し，火災により発生した煙の排出（以降，「排煙」という）や拡散を抑制するなどの運用を行うことで，トンネル利用者が煙に巻かれることなく避難を完了するための環境を提供する．また，消防等による消火救急活動時の支援にも用いられることがある．このように換気施設は前項に挙げた通常時におけるトンネル内環境の確保に加え，火災時の安全性を確保するうえでも重要な役割を併せ持っている．

１．２．１　火災時におけるトンネル換気施設の運用

換気施設が設置されているトンネルで火災が発生した場合，換気施設を用いて煙の流れをコントロールすることになるが，内部に存在する利用者の位置によりその運用を適宜選択する必要がある．通常，道路トンネルでは以下に示す運用が採用される．

（ａ）発災地点付近の車道内風速を低化させる運用

この運用は一方通行のトンネルで全線に渡り渋滞が想定されるケースや，1 本のトンネルを対面通行で利用するケースなどに適用される．これは，発災地点の前後に利用者が存在しているため非常口などに避難を完了するまでの間，火災で発生した煙を成層状態に保ち，極力拡散しないようにトンネル内風を制御する必要があるためである．実際には発災地点付近の風速を低下させるよう各地点の風速を監視しながら，ジェットファンや軸流送風機などの換気施設を運転する．本運用は風速コントロールのし易い横流換気方式の他，縦流換気方式でも実用化がなされている．図‐10 は本運用におけるトンネル内の煙の拡散状況と利用者の避難状況のイメージである．



図‐10　トンネルの車道内風速を低下させる運用のイメージ

（ｂ）発災地点の下流側に風を流す運用

本運用は一方通行のトンネルで渋滞の発生が想定されないケースなどに適用される.

このケースではトンネル内で火災が発生した場合，発災地点の下流側に存在する車両はそのまま通過しトンネル外部に通り抜けるため，利用者の避難時の安全を考慮する区間は発災地点の上流側のみとなる．このため，トンネルの出口方向に風を流す運転を行う.

図 - 11 に本運用における煙の流れと利用者の避難状況のイメージを示す.

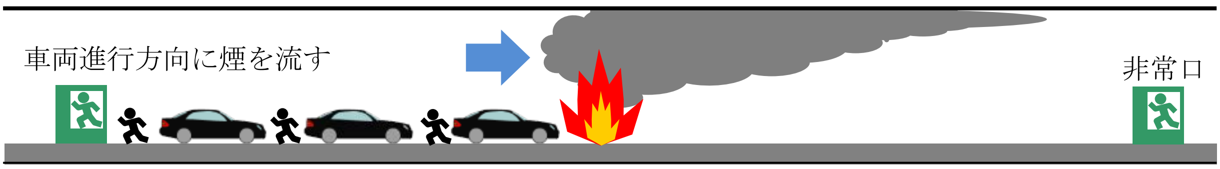


図 - 11　発災地点の下流側に風を流す運用のイメージ

１．２．２　国外における火災時の換気運用の考え方

国外においても道路トンネルにおける火災時の対応については様々な検討が進められている．特に山岳地帯を有しトンネルの多い欧州中心に 2000 年前後に大規模な道路トンネル火災が頻発し（表 - 1）数十名におよぶ犠牲者や負傷者が発生したことから，火災時における換気方式や運用について様々な研究や実証実験が行われている．

表 - 1　国外における道路トンネル火災事故例 2)

発生年	トンネル名（国名）	概要
1993	Serra a Ripoli Tunnel（Italy）	延長：442 m 原因：大型トラック 5 台と乗用車 11 台による衝突事故 被害：4 名死亡，4 名負傷 その他：2 時間半後に鎮火
1996	Isola delle Femmine motorway tunnel（Italy）	延長：148 m 原因：タンクローリー，バス，乗用車 16 台の玉突き衝突事故 被害：34 名負傷，5 名死亡．
1999	Mont Blanc Tunnel（France/Italy）	延長：11.6 km 原因：大型貨物車両の発火 被害：39 名死亡 その他：53 時間後に鎮火
1999	Tauern Tunnel（Austria）	延長：6.4 km 原因：大型トラックの追突事故 被害：12 名死亡，49 名負傷 その他：15 時間後に鎮火
2000	Seljestad Tunnel（Norway）	延長：1.3 km 原因：トラック 8 台の玉突き衝突事故 被害：20 名負傷
2001	St. Gotthard Tunnel（Switzerland）	延長：16.9 km 原因：大型トラック同士の衝突事故 被害：11 名死亡 その他：2 日後に鎮火
2003	Fløyfjell Tunnel（Norway）	延長：3.1 km 原因：乗用車の側壁衝突事故 被害：1 名死亡

表 - 1　国外における道路トンネル火災事故例 [2)]　（つづき）

発生年	トンネル名（国名）	概要
2004	Baregg Tunnel（Switzerland）	延長：1.1 km 原因：タンクローリーと乗用車の追突事故 被害：1 名死亡，5 名負傷
2005	Fre´jus Tunnel（France/Italy）	延長：12.9 km 原因：大型車両からの発災 被害：2 名死亡
2005	Highway tunnel on B31（Germany）	延長：0.2 km 原因：乗用車の正面衝突事故 被害：4 名死亡，
2006	Viamala Tunnel（Switzerland）	延長：0.7 km 原因：バスと乗用車 2 台の衝突事故 被害：9 名死亡，5 名負傷
2006	Eidsvoll Tunnel on E6,（Norway）	延長：1.2 km 原因：タンクローリーと乗用車の正面衝突 被害：1 名死亡
2007	Burnley Tunnel（Australia）	延長：3.5 km 原因:3 台のタンクローリーと 4 台の乗用車による玉突き事故 被害：3 名死亡 その他：水噴霧設備稼働
2007	San Martino Tunnel（Italy）	延長：4.8 km 原因：トラックの玉突き衝突事故 被害：2 名死亡，10 人負傷
2007	Newhall Pass tunnel（USA）	延長：166 m 原因：トラックの壁面衝突事故と追突事故 被害：3 名死亡，23 名負傷 その他：24 時間後に鎮火
2009	Eiksund Tunnel（Norway）	延長：7.7 km 原因：大型トラックと乗用車の衝突事故 被害：7 名死亡
2012	Hsui-San Tunnel（Taiwan）	延長：12.9 km 原因：トラック，バス，乗用車の衝突事故 被害：2 名死亡，31 名負傷

道路トンネルの換気に関する技術は欧州や米国を中心に発達してきており，横流換気方式や半横流換気方式，縦流換気方式など国内とほぼ同様の方式が各所で採用されている．

通常時における換気施設の設置基準については，例えば英国では 400 m 以上，ドイツでは 350 m～700 m 以上のトンネルに設置するなどその定義は国により異なるが，火災時における換気施設の有効性については一定の認識がなされている．火災と煙のコントロールを行う目的として，利用者の避難を促進させることによる人命の確保，救助と消火活動の支援，火災による爆発等の回避，トンネル構造や施設物，周辺環境へのダメージを低減させることなどを掲げている．さらに，トンネル火災時の換気施設の目的として火災の拡大を防止するために新鮮空気の供給を制限すること，発生した煙の拡大を防止すること，煙の成層状態を保ち火点上下流の避難環境を確保すること，トンネル構造物や諸施設へのダメージを最小限に抑えること，救助や消火活動時の支援出来ることが掲げられている．また，複数ある換気方式のうち，煙を集中的に排煙することが可能である横流換気方式や半横流換気方式が火災時の安全性を確保するうえでも理想的なシステムであると考えられている．

図 - 12 に欧州における横流換気方式，半横流換気方式における排煙運用のイメージ図を示す．

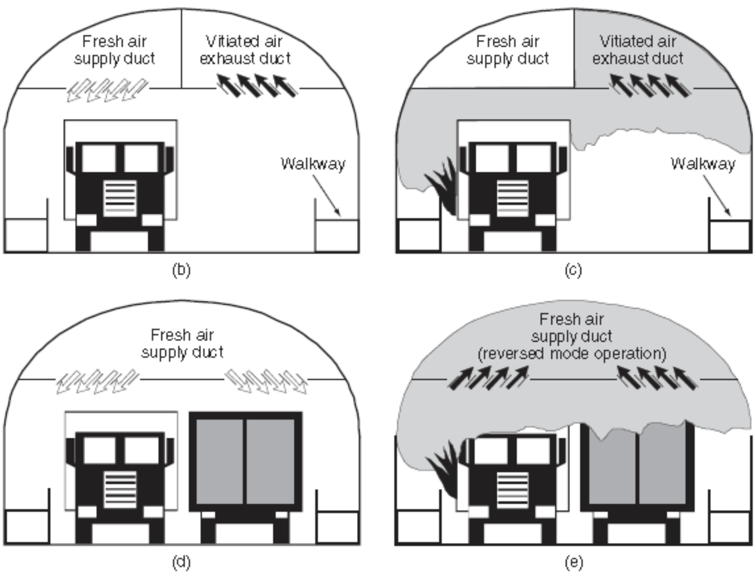
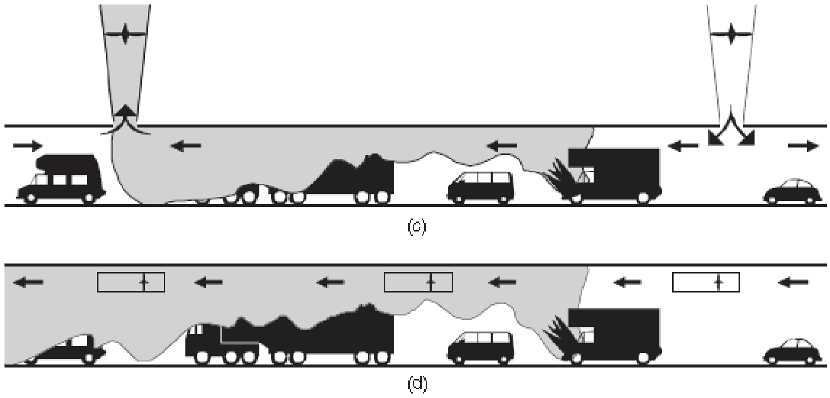


図 - 12　ヨーロッパにおける横流換気方式の排煙 [2)]



図‐13　ヨーロッパにおける縦流換気方式の排煙 2)

図‐13 に縦流換気方式における排煙のイメージを示す．国外でも建設コストを抑えられる縦流換気方式の採用が進んでいるが，図に示すとおり発災地点から上流側の安全性は確保されるものの下流側については煙の拡散が欠点となる．しかし，国内のように煙の拡散したエリア内の利用者の避難環境についてはほとんど議論が無く，この点が国内と国外の大きな相違点である．ここで，ヨーロッパにおけるトンネルの例としてオーストリアの Plabutsch Tunnel（プラブッチュトンネル）における排煙方式について記述する．表‐2 はトンネルの諸元及び排煙方式の概要である．同トンネルでは年 1 回，火皿を用いた火災時の排煙機能に対する確認試験を実施している．火皿面積は 2 m^2，燃料は軽油 40ℓ及びガソリン 20ℓの計 60ℓである．なお，この場合の火災規模は乗用車 1～2 台程度（3～5 MW 相当）である．試験は火皿点火時の車道内風速を 1 m/s 程度とし，点火後約 2 分程度は換気施設を運転せずに煙を対流させ，その後排煙口を開き排煙運転を実施，火皿より発生した煙の排出状況を確認している．なお，換気施設運転後，約 2～3 分でトンネル内に滞留していた煙はほぼなくなる状況である．このように，欧米各国では，過去の深刻な道路トンネル火災事故を教訓に，火災時の安全性を確保するための様々な研究や施策が現在も進められている．

図‐14 にトンネル内の状況，図‐15 に火皿を用いた確認試験の状況を示す．

表 - 2　Plabutsch Tunnel（プラブッチュトンネル）概要 [3)4)]

項目	内容
所在地	オーストリア　グラーツ市
延長	9,919 m
トンネル区分	都市内トンネル
車線構成	2 車線 1 方向×2 チューブ
開通時期	1 期線 1987 年，2 期線 2004 年
交通量	約 34,000 台/日（年平均日交通量,2013 年）
換気方式	横流換気方式 ・換気区間 5 区間 ・換気量 200 m^3/s（1 区間当り）
排煙方式	大排煙口排煙方式 ・排煙量 120 m^3/s ・排煙口面積：12 m^2/箇所 ・排煙口間隔：50～100 m ・火災時 1～3 か所の排煙口を開ける ・軸流送風機の耐熱仕様は 400 ℃，2 時間

図 - 14　Plabutsch Tunnel（プラブッチュトンネル）トンネル内の状況

図 - 15　排煙機能確認試験の状況

１．３　トンネル換気施設設計の現状

道路トンネルにおける換気施設の役割や換気方式，火災時の運用については既出のとおりであるが，実際にトンネルの設計を行うためには様々な条件を考慮しながら換気方式や換気施設の設備規模を決定する必要がある．道路トンネルの換気施設に関する設計基準としては，国土交通省等のトンネルを対象とした，道路トンネル技術基準（換気編）[5]，道路トンネル非常用施設設置基準[6]，NEXCO のトンネルを対象とした，設計要領第三集（トンネル編，トンネル換気）[7]，都市高速道路トンネルを対象とした，首都高速道路機械設備設計要領（トンネル換気設備編，首都高速道路）[1]，トンネル非常用施設設計要領（首都高速道路）[8]などが制定されており，表‐3 及び図‐16 に示す国内の一般国道や高速道路を含む 10,044 箇所[9]の道路トンネルについては，これらの基準に基づき諸施設の設計や施工がなされている．これらの設計基準類では通常時の換気に必要な設備規模を先に定め，火災時の排煙や煙の拡散の抑制に用いるトンネル換気施設の規模は通常時，すなわち自動車から排出されるガスの希釈や除去に必要な能力の範囲内とされていることが一般的である．ゆえに，排煙や煙の拡散抑制に必要な換気施設の規模を具体に定める内容は含まれていない．なお，都市内高速道路トンネルを対象とした設計基準では，通常時と火災時の換気設備規模を比較し当該トンネルの換気設備を決定する記述がなされている例もあるが，主に延長が 10 km 以上の長大トンネルを対象としたもので，設計基準にこのような記述が盛り込まれたのも 2000 年以降のことである．これは，近年いくつもの長大トンネル建設プロジェクトが推進されてきたこと，また，同時期に欧州で発生したモンブラントンネル等の大規模火災事故の影響もあり，トンネル火災に対する防災安全対策の重要性が再認識されたことによる．このような対策の例として 1997 年に開通した東京湾アクアライン（延長約 15 km，うちトンネル延長約 9.5 km，縦流換気方式）にて関係地方公共団体，消防機関，東日本高速道路株式会社等の連携強化による災害対策の強化，また，2010 年に開通した首都高速道路中央環状線（山手トンネル，延長約 11 km，うちトンネル延長約 9.8 km，横流換気方式）については，都市内長大トンネルの防災安全に関する調査研究委員会における検討結果を踏まえ，非常用施設の設置，発災時の運用，広報啓発活動などの総合的な防災安全対策が計画実施され，既に開通した山手トンネルに接続する形で 2015 年 3 月に開通した中央環状品川線（延長約 9.4 km，うちトンネル延長約 8.4 km，縦流換気方式）についても中央環状新宿線同様の検討が行われている[10]．

このように，一部の道路トンネルでは計画や設計を行う時点からトンネル火災を対象とした検討が実施され様々な対策を講じている例が見受けられるが，概して延長が長くトンネル内で火災が発生した場合の影響が強く懸念される場合などに限られているのが現状である．

表 - 3　国内の道路トンネルの延長区分と箇所数 [10)]

延長区分	100 m 未満	100 m ～500 m 未満	500 m ～1,000 m 未満	1000 m ～3,000 m 未満	
箇所数	2,640	5,003	1,382	917	
割合	26.28%	49.81%	13.76%	9.13%	
延長区分	1,000 m ～3,000 m 未満	3,000 m ～5,000 m 未満	5,000 m ～10,000 m 未満	10,000 m 以上	合計
箇所数	917	86	13	3	10,044
割合	9.13%	0.86%	0.13%	0.03%	100.00%

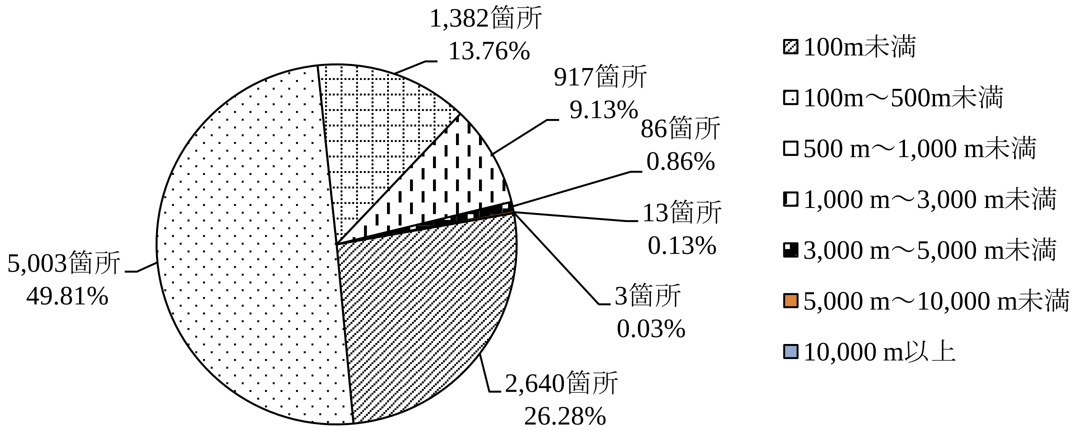


図 - 16　国内の道路トンネル延長とその割合（2014 年） [10)]

１．４　自動車排出ガス規制とトンネル換気施設への影響

近年の自動車排出ガス規制の強化により，自動車から排出されるガスは短期間で大幅に削減されてきている．自動車の排出ガス規制は 1968 年の大気汚染防止法 [11]の制定によるガソリン車の排出ガス規制が始まりである．図 - 17，図 - 18 に自動車の窒素酸化物及び粒子状物質に対する排出ガス規制による低減率を示す．トンネル内の視環境に影響を与える黒鉛の主要な発生源であるディーゼル車については 1972 年の黒煙規制 [12], 1974 年に窒素酸化物などに対する規制 [13]が制定され, さらなる大気環境の改善を目的に 1994 年の短期規制 [14], 2004 年の新短期規制 [15]，2005 年の新長期規制 [16]，2009 年のポスト新長期規制 [17]が導入されている．ディーゼル車の窒素酸化物の規制値については 1994 年制定の短期規制で 6.0 g/kwh（エンジン出力 1 kw 当り 1 時間の排出量を表す単位）とされていた規制値が，2009 年のポスト新長期規制では 0.7 g/kwh の約 90%削減，粒子状物質については 0.7 g/kwh から 0.01 g/kwh へ約 98%削減と大幅な規制強化が進んでいる．また，2000 年には東京都環境確保条例 [18]に基づくディーゼル車を中心とした排ガス対策が施行され，関東地方の八都県市において規制基準を満たさない車両の通行が禁止されている．このようなことから，都市圏を中心に自動車排出ガスの削減は確実に達成されてきており，これまで環境基準値をクリア出来なかった箇所でも近年では基準値を下回るようになってきている．道路トンネルも同様の流れを汲んでおり，通常時における換気施設の運転時間も自動車排出ガスの傾向にならい大幅に減少している．

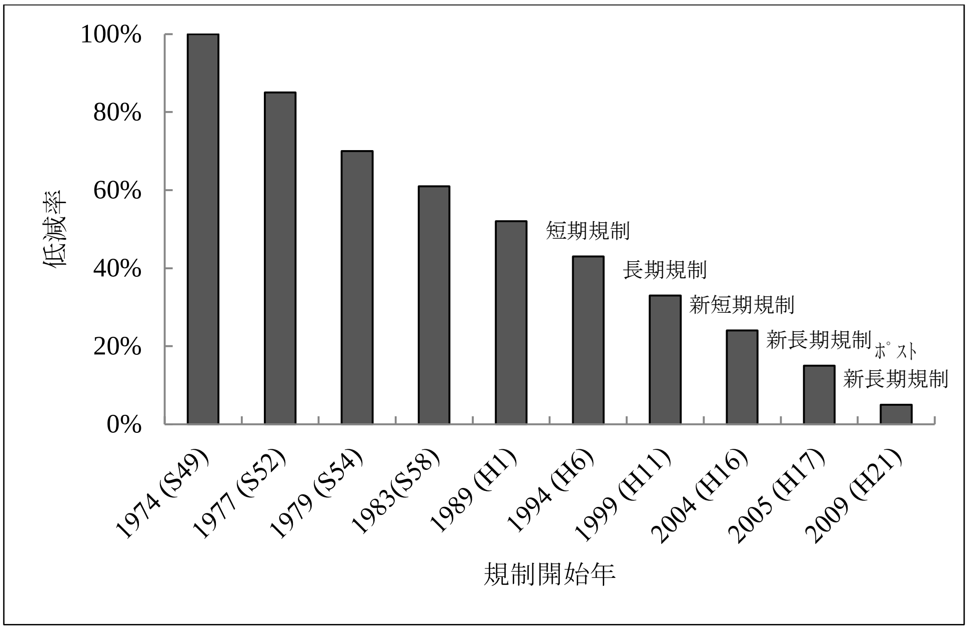


図 - 17　自動車排出ガス規制の経緯（窒素酸化物：NOx，ディーゼル重量車）
参考文献：国土交通省記者発表資料平成 20 年 3 月 25 日 [19)]

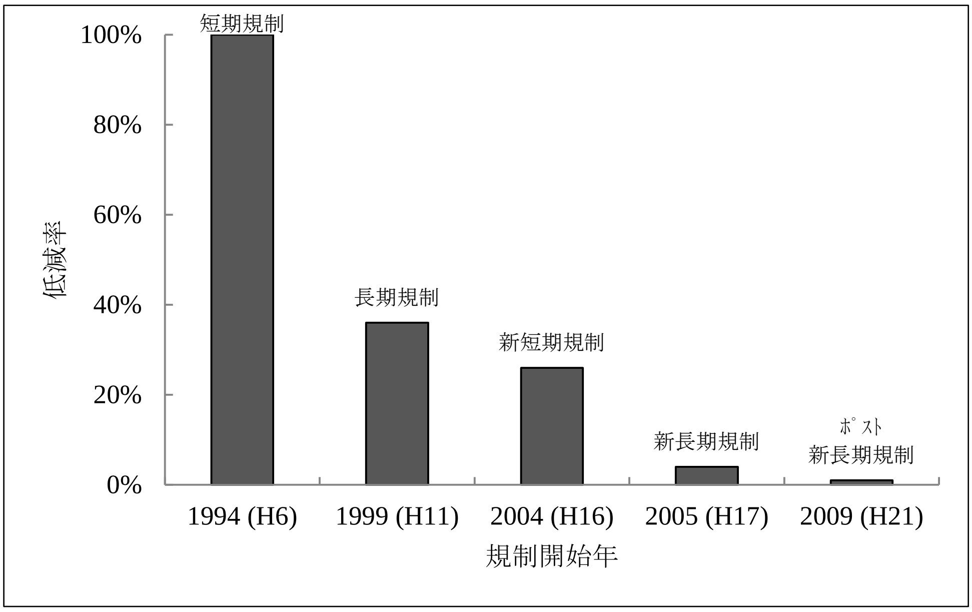
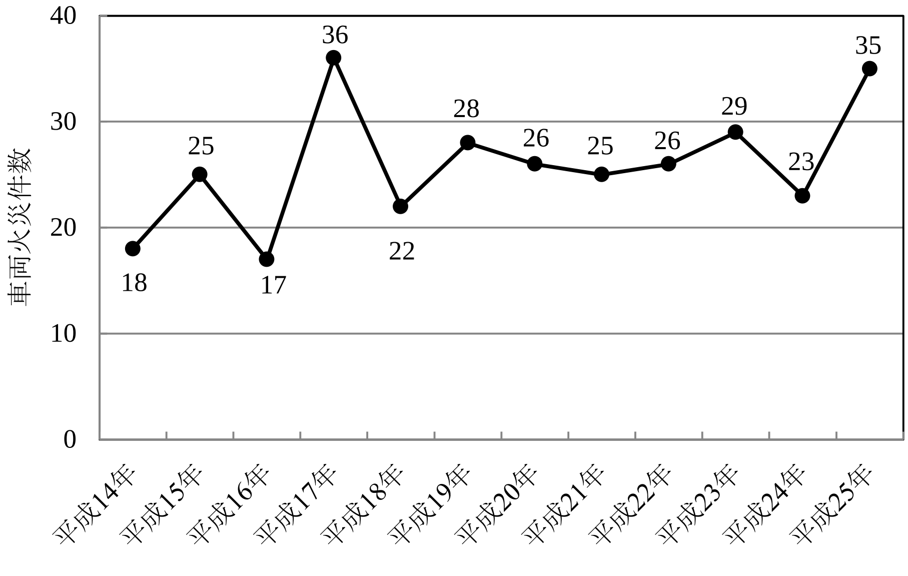


図 - 18　自動車排出ガス規制の経緯（粒子状物質：PM，ディーゼル重量車）
参考文献：国土交通省記者発表資料平成 20 年 3 月 25 日 [19)]

１．５　本研究の目的

前述のとおり，道路トンネルには自動車の排出ガスや粉じん等による視環境の悪化，排出ガス中に含まれる有害物質の影響を改善するため状況に応じ換気施設が設置されているわけであるが，近年の自動車排出ガス規制の強化によりトンネル内の環境は急激に改善しており，視環境の確保や有害物質の希釈や除去などを目的とした換気施設の運転時間は減少の一途をたどっている．一方で換気施設は火災時に発生する煙の排煙や拡散の抑制という人命に係る重要な機能も有しており，トンネル内の利用者が非常口などの安全空間に避難するまでの避難環境を確保するという大きな役割を持っている．このような状況のもと，国内の道路トンネルでは図‐19 に示すとおり毎年 20～30 件の火災が発生[20]しており，ここ数年はゆるやかに増加する傾向にある．このため一部の長大トンネルでは火災時の総合的な安全対策が講じられているものの，その他のトンネルについては換気施設を用いた排煙を対象とした設置基準や設計基準が存在しない．ゆえに，このまま自動車の排出ガス規制が進み換気施設によるトンネル内環境の確保という役割が不要となれば，火災時に必要な排煙のあり方や規模を議論せずに換気施設が縮小，撤去という道をたどることになる．ましてや延長が短い道路トンネルでは，火災時の避難が容易であろうというような定性的観点からなおさらである．2004 年に欧州で制定された「EU ディレクティブ（欧州横断道路網のトンネルの安全性に関する最低限の要求事項に関する 2004 年 4 月 29 日付け欧州議会･理事会指示）」では，排煙を含む安全対策をすべきトンネル延長が「500 m を超えるトンネル」と記載されている．また，ヨーロッパにおける最近の動向として，延長の短い都市内トンネルを対象に火災時の排煙とトンネル防災施設の有効性に関する研究事例 [21]が徐々に見受けられるようになってきている．

本論文はこのような事実に着目し，500 m 以下の延長の短いトンネルの例として 450 m のトンネルをモデルとし，トンネル換気施設の縮小や撤去が火災時の安全性を確保するうえで妥当であるか否かという観点から，換気施設による排煙の有効性について検証を行ったものである．さらに，火災時の安全性を確保するために必要な排煙量の規模について検討した．



図－19　国内の道路トンネルにおける車両火災件数の推移[20)]

２．方法及び条件

２．１　方法

道路トンネルの火災時における安全性の評価を行うためには，火災発生後の時間変化に伴う煙の挙動とトンネル利用者の避難状況の関係を把握することが必要である．

本研究における煙挙動解析は本邦で開発された乱流モデルにLES（Large Eddy Simulation）を用いた三次元シミュレーションFireles[22]を利用する．本シミュレーションは実大実験結果との比較検証が行われており[23][24]，道路トンネル火災時の煙の挙動を評価する際，国内で最も利用されているモデルである．トンネル利用者の避難状況の把握については一次元避難シミュレーションを利用する．このモデルでは時間の経過とともに避難をする利用者の数を把握することが可能である．これら双方のモデルを連携させ，煙の影響により一定のしきい値を超えた場合に避難に支障が出るという条件でモデル化し，トンネル利用者の避難の状況をトンネル長さ軸と時間軸によるコンター図で表現し，一定濃度の煙に暴露される人数（煙暴露者数）によってトンネル火災安全性の評価をする手法が開発された[25]．本論文ではこの手法を評価手法として活用し，10分経過時の煙暴露者数によって評価した．

２．２　条件

２．２．１　トンネル構造

本研究では都市部のアンダーパス等に多くみられる船底型のトンネルをモデルとした．

これらのトンネルは地下空間を利用してビルなどの建築物や鉄道，他の道路などを迂回する目的で建設されており比較的延長が短い場合が多い．

よって，本研究におけるモデルトンネルの延長を450 m（入口区間長150 m縦断勾配-4%，中央区間長150 m縦断勾配0%，出口区間長150 m縦断勾配4%）とした（図 - 20）．また，このようなトンネルは開削工法にて建設されていることが多いことから断面形状は矩形とし，内空寸法は1960年代に開削工法で建設された2車線一方通行の都市内トンネル[26)]を参考に幅8.5 m，高さ4.5 mとした（図 - 21）．

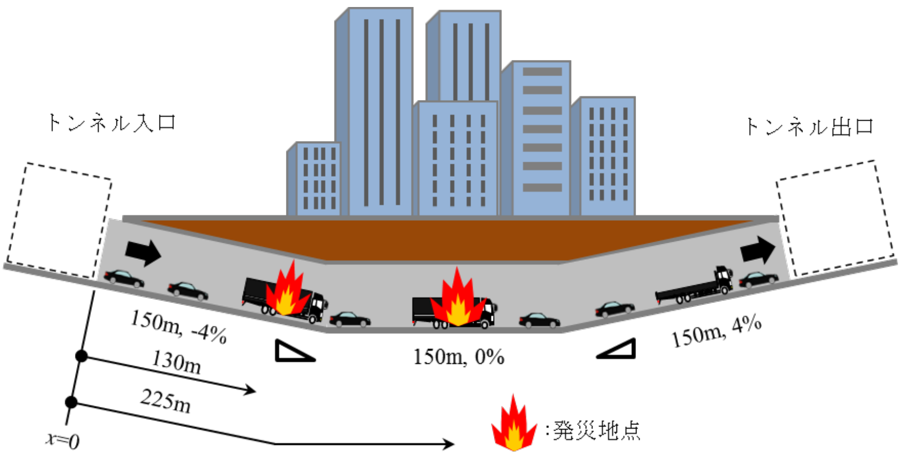


図 - 20　モデルトンネル概要図

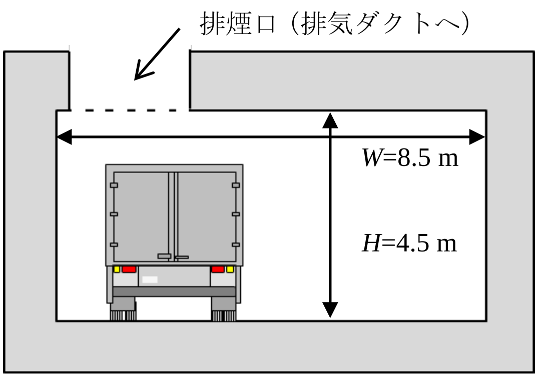


図 - 21　モデルトンネル断面図

２．２．２　解析領域

解析領域はトンネル入口を原点とし，延長450 mに対し計算格子幅をx方向0.333 m，y方向0.307 m，z方向0.236 m，計算格子分割数は，x方向を1429，y方向を43，z方向を29とした．

なお，トンネル両坑口間の圧力差を起因とするトンネル内の自然風を与えるため，解析領域に坑口外部の大気領域（x方向40 m，y方向12.1 m，z方向12.5 m）を含むものとした．

また，トンネル壁面の材質は厚さ500 mmのコンクリートとし，天井及び壁からの吸熱量を考慮するため，比熱879 J/kgK，密度2,100 kg/m^3，熱伝導率1.105 W/mKと設定した．

２．２．３　交通条件

交通条件はトンネル内全域において渋滞を想定し大型車の混入率を10%とした．大型バスの混入率は2%程度[27)]であるがトンネル内の利用者数に影響を与えることから，バスを含まないケースと含むケースを分けて検討を行うものとした．なお，車線数は2車線とし，車頭間隔は普通車及び大型車それぞれ4 m，8 mとした．また，各車両における平均乗車人数は，参考文献[28)]より小型車1.4人，大型車1.3人とした．なお，このように想定した場合，トンネル内渋滞車両の利用者総数はバスを含まない場合が平均178.8人，バスを含む場合は平均272.8人である．

２．２．４　火災発生時の条件

道路トンネル内では通行する車両の影響や両坑口に生ずる圧力差などにより常時1～2 m/sの風が生じていることが多い[29)]．火災で発生した煙は低風速でも挙動が変化し利用者の避難環境に影響を与えることが考えられる．よって，本研究ではトンネル両坑口間に圧力差（以降「坑口間圧力差」という）0 Pa（初期縦流風速 0 m/s），5 Pa（0.85 m/s），10 Pa（1.2 m/s）の3ケースを設定することとした．なお，自然風は図 - 20の左側（トンネル入口）から右側（トンネル出口）に流れるものとするが，本論文ではトンネル内全区間に車両が存在する条件のため，自然風が右側から左側に流れている場合も同様の結果となる．また，発災地点により煙の拡がる状況は異なることから，避難時の安全性に大きな影響を与えることが想定される．このため，発災地点両側の利用者の避難距離が長いトンネル中央部（トンネル入口から225 m地点，縦断勾配0%部分）及び自然風の影響により煙の拡がる距離が長い入口区間（トンネル入口から130 m地点，縦断勾配-4%部分）の2か所とした．発災車両は大型車両1台と想定し，新東名高速道路建設時に行われた清水第三トンネルでの実験結果を参考に発熱速度をαt^2曲線（α=86.8 W/s^2，図 - 22）により480秒後に対流成分18 MW（有効成分30 MW）とし，発煙速度曲線も発熱速度と同様の形状として最大発煙速度を90 g/sとした．大型車両の実大火災実験データ[30)]よると，発災の5分前後から急激に熱出力が大きくなって

いるため，本論文における解析時間はトンネル利用者の避難行動が可能な時間として10分間（600秒）とした.

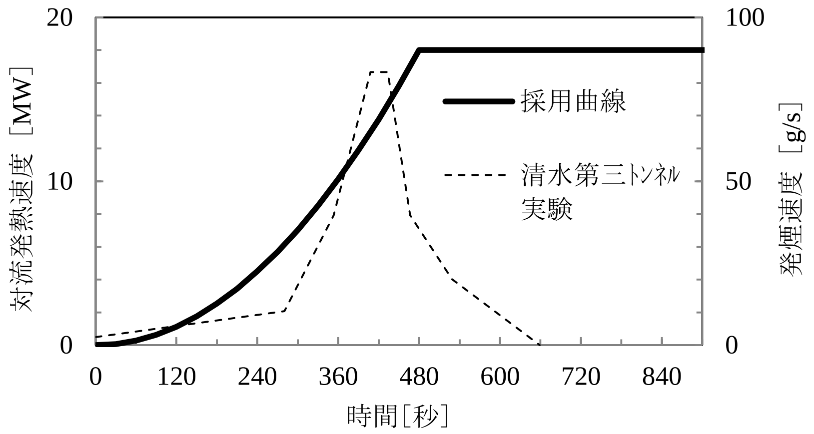
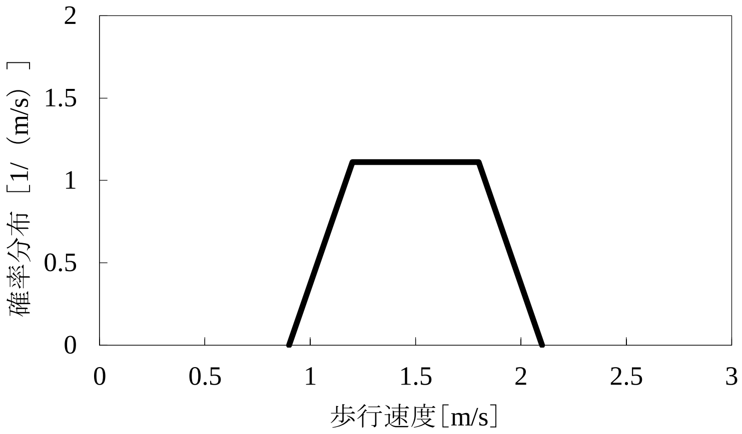


図 - 22　発熱速度及び発煙速度曲線

２．２．５　避難行動の定義とモデル

本論文ではトンネル利用者が暴露される煙濃度（*Cs*濃度）を0.4 m^{-1}，路面からの煙の高さを1.5 mとした．これらの数値は国内の道路トンネル火災時における安全性評価の際に一般的に用いられている[31]．トンネル利用者の避難必要性認識の条件は既報[25]と同様とし，火災で発生した煙（*Cs*濃度0.4 m^{-1}）が利用者の頭上（トンネル天井部）に到達した時点及び他の利用者が避難をしている状態を確認した時点で避難の必要性を認識し，5～15秒後に避難行動を開始することとした．なお，実際の避難行動開始までには避難準備時間として5～15秒の時間差を設けている．避難時の歩行速度は，既報中のCase 3（図－23）と同様とし，平均速度が1.5 m/sになるように設定した．避難シミュレーションは各ケースに対し1,000回計算を行い，10分経過時の平均煙暴露者数を求めた．



図－23　避難者の歩行速度モデル（既報[25]　Case3）

３．排煙をしない自然換気状態における安全性

本論文は500 m以下の延長の短い道路トンネルを対象に，火災時の排煙の有無における有効性について評価を行うことが目的である．まず初めに，自然風を有するが排煙をしない自然換気の状態について検討を行い，火災時における利用者の安全性に影響を与える要因を検証した．シミュレーション条件は表‐4のとおりである．シミュレーションケースは225 m及び130 m各々の発災地点において3種類の坑口間圧力差を与え，ケース名をF225_0Paと表す．F225は発災地点の位置を，0Paは坑口間圧力差を表すものとする．ケース数は計6ケースである．なお，本項ではトンネル内にバスを含まない条件で検討を実施しバスが存在するケースは後述する．図‐24，図‐25，図‐26，図‐27，図‐28，図‐29はトンネル内の煙の拡がる状況と避難する利用者の行動を時間の経過で表した避難者行動マップ[25]である．x軸はトンネル入口からの距離［m］を，y軸は発災後の経過時間［分］を表しており，着色された部分は既報[25] より火災により発生した煙の濃度と高さで定義された危険度Rを示している．図の緑と橙のエリア境がCs濃度0.4 m^{-1}，煙高さ1.5 mとなる避難行動の可否の境界である．なお，この場合の煙濃度はトンネル幅方向の平均濃度である．また，黒のラインはトンネル利用者の避難の状況を表しており，1000回計算をした結果のうちの一例である．図において0分から縦に黒のラインが立ち上がっている箇所が各トンネル利用者が発災時にいた地点である．その後，避難の必要性を認識してから坑口に向かって歩行し，危険度R=4となった時点で煙に暴露され行動不能になる．図上方のグラフは10分経過時にトンネルのどの位置で行動不能となるかを示したものである．なお，401～450 mの区間については，坑口から10 m以内にトンネル利用者が近づいた場合に避難が完了したものと判断したため，算出した煙暴露者数に50 m/40 mを乗じて50 m区間あたりに換算した値を示している．

F225_0Pa（図‐24）では，坑口間圧力差が0 Paであるため，発災地点で発災した煙は自然風の影響を受けることなく両坑口に向かい対称に拡がっている．一方，F225_5Pa（図‐25），F225_10Pa（図‐26）のケースでは5 Pa（0.85 m/s）及び10 Pa（1.2 m/s）の影響を受け，発災地点で発生した煙が図の右側に流され，発災地点から右側にかけて煙が拡がっている一方で，発災地点の左側では煙の拡がりは図‐24に比べ抑制されている．

F130_0Pa（図‐27）の場合，発災地点がトンネル入口側の下り勾配部であるため，火災で発生した煙は勾配の影響を受け図の左側に遡上している．また発災地点から右側の区間についても発災地点左側での煙の遡上の影響が強く，トンネル中央部で煙の進行が停止している．F130_5Pa（図‐28）及びF130_10Pa（図‐29）では坑口間圧力差0 Paの傾向と大きく異なっている．発災地点で発生した煙の挙動は発災地点が225 m，5 Pa及び10 Paの傾向と同様，坑口間圧力差の影響により図の右側に拡がっており，下り勾配を起因とする遡上の影響よりも自然風の影響が大きいことがわかる．このように，自然換気状態のトンネルでは低風速であっても自然風が存在する場合，煙がトンネル内に拡がる．

表 - 4　シミュレーション条件

項目	条件
発災地点	入口から225 m（縦断勾配0%）及び130 m（縦断勾配-4%）
トンネル両坑口間の圧力差（自然風）	0 Pa（0 m/s），5 Pa（0.85 m/s），10 Pa（1.2 m/s）
車両構成	大型車混入率10%，バス無し

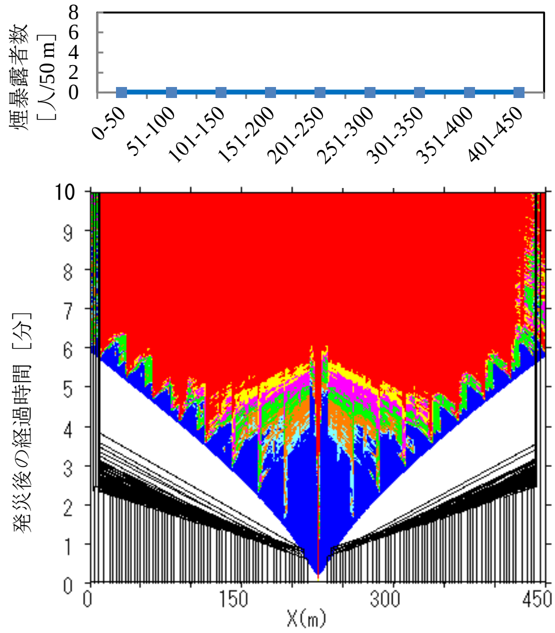


図 - 24　避難者行動マップ　F225_0Pa

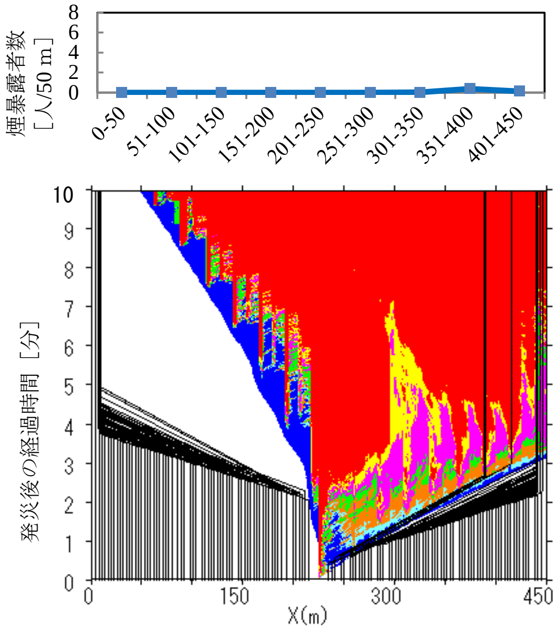
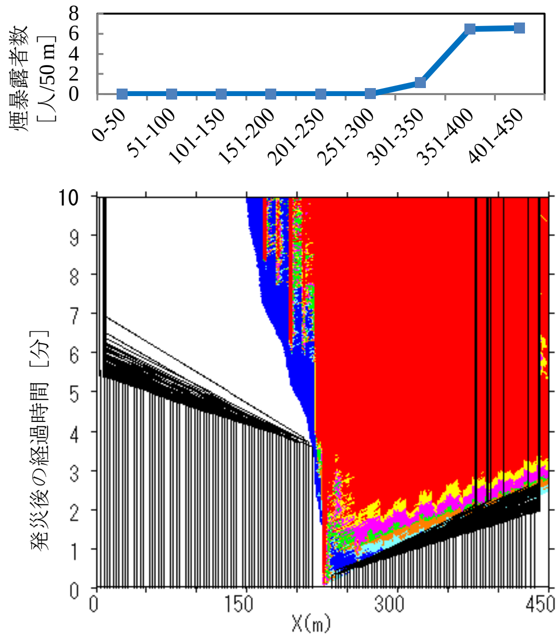
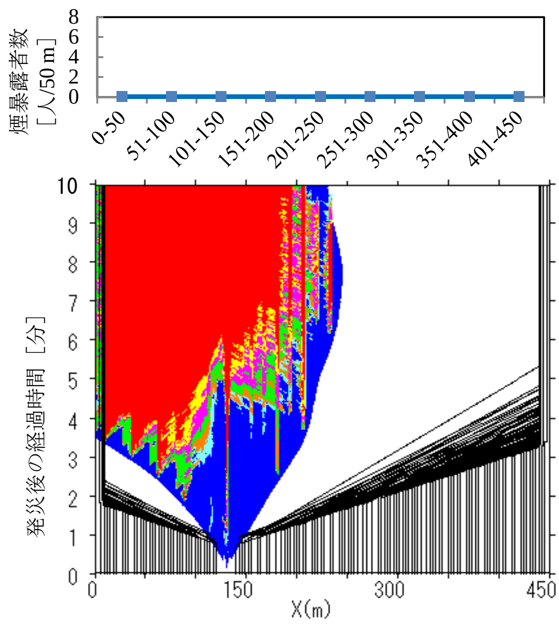


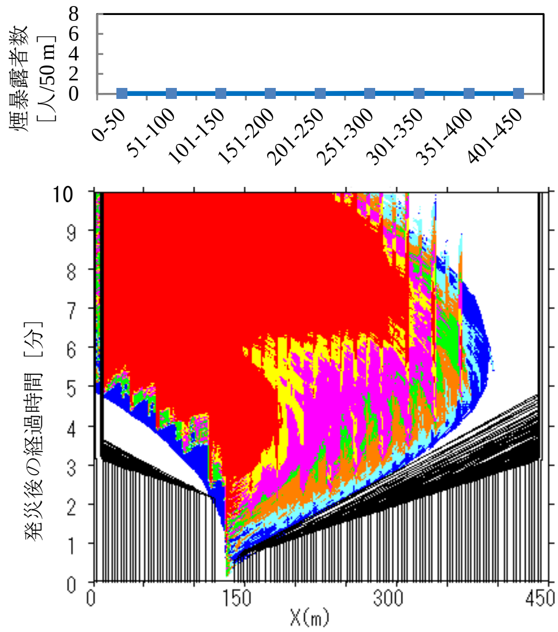
図 - 25　避難者行動マップ　F225_5Pa



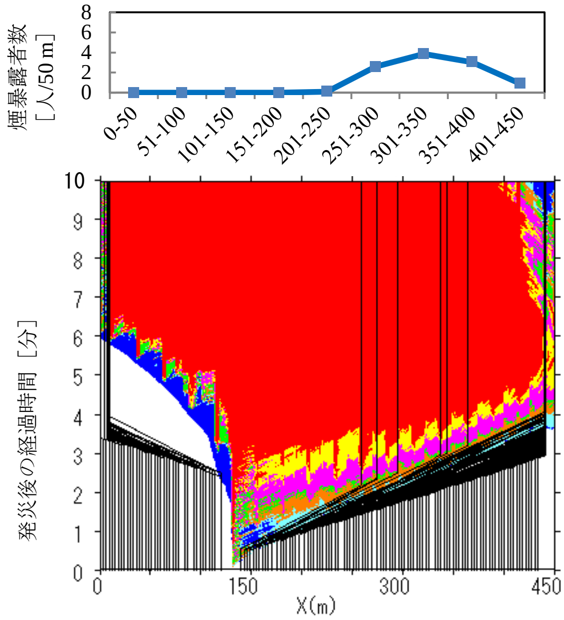
図－26　避難者行動マップ　F225_10Pa



図－27　避難者行動マップ　F130_0Pa



図－28　避難者行動マップ　F130_5Pa



図－29　避難者行動マップ　F130_10Pa

表－5 は各ケースにおける平均煙暴露者数の結果である．坑口間圧力差が 0 Pa（0 m/s）の場合，いずれの発災地点においても煙暴露者数は発生していない．これはトンネル利用者が火災で発生した煙に巻かれることなく両坑口に避難が完了したことを示している．坑口間圧力差が 5 Pa（0.85 m/s）のケースでは自然風の影響により発災地点の出口側に煙が流され 1 人未満ではあるが煙暴露者数が発生している結果となっている．一方，坑口間圧力差が 10 Pa（1.2 m/s）の場合，入口から 300 m より始まる上り勾配部を中心に急激に煙暴露者数が増えている．この結果から，10 Pa（1.2 m/s）程度の自然風がトンネル内に生じている場合，火災で発生した煙が利用者の避難方向に流され煙に暴露されていることがわかる．

よって，排煙が出来ない自然換気状態のトンネルでは，利用者の避難時に重大な影響を与える風速は 10 Pa（1.2 m/s）程度の低風速であることを示している．

表－5　自然換気状態の平均煙暴露者数

坑口間圧力差 ＼ 発災地点	0 Pa（0 m/s）	5 Pa（0.85 m/s）	10 Pa（1.2 m/s）
225 m	0 （0 / 0）	0.537 （0 / 0.537）	14.136 （0 / 14.136）
130 m	0 （0 / 0）	0.032 （0 / 0.032）	10.480 （0 / 10.480）

※（発災地点上流側の人数/発災地点下流側の人数）

以下に本章の結果をまとめる．

排煙をしない自然換気状態のトンネルにおいて，

・坑口間圧力差が 5 Pa（0.85 m/s）以下の自然風であれば，利用者の避難環境は確保出来る．

・坑口間圧力差が 10 Pa（1.2 m/s）以上の自然風の場合，利用者の避難環境は極端に悪化する．

ゆえに，排煙が出来ない自然換気状態のトンネルで火災が発生した場合，低風速ではあるが1.2 m/s程度の自然風が存在すると利用者の安全性に重大な影響を与える．

４．排煙の効果（バスが存在しない場合）

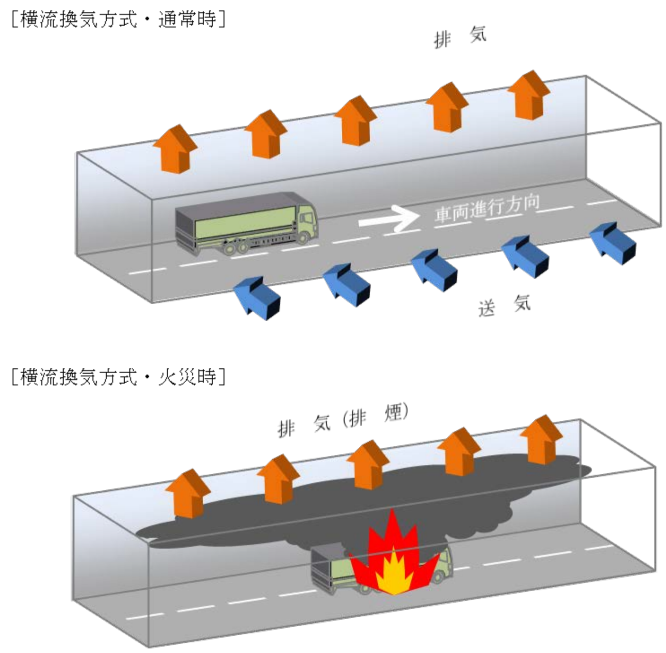
前章の結果から，排煙をしない自然換気状態のトンネルでは10 Pa（1.2 m/s）程度の自然風でも影響は大きく利用者の安全性に影響があることから，本章では排煙を行った場合の有効性について検証した．

４．１　排煙方式

排煙方式は火災で発生した煙を直接外部へ排出可能である横流換気方式をモデルとした．

同方式は通常時に利用している排気系統を排煙ダクトとして活用し，火災が発生した区間を中心に排煙を行うため，火災時の安全性を確保する上で効果が高い方式である（図－30）．都市内トンネルは重交通のため発生する自動車排出ガスも多い．よって，延長が短い場合でも空気を強制的に入れ替えることが出来，トンネル内環境の維持に効果的である横流換気方式や送気，排気のみを行う半横流方式の採用事例が多い．

ゆえに，本研究における排煙方式は延長が比較的短い 450 m のトンネルを対象とするため，発災地点によらず全区間で排煙のみを行うものとした．参考として表－6 に首都高速道路におけるトンネルの換気方式及び主な諸元を示す．



図－30　換気方式概念図

表 - 6　首都高速道路におけるトンネルの換気方式及び主な諸元 [32)33)]

トンネル名	汐留	千代田	霞が関	羽田	八重洲
開通年	昭和 37 年	昭和 39 年	昭和 39 年	昭和 39 年	昭和 48 年
換気方式	送気半横流	横流	送気半横流※2	排気半横流※2	横流
延長	286 m	1,900 m	781 m	303 m	1,400 m
換気所数	※1	9 か所	2 か所	2 か所	2 か所

トンネル名	東京港	桜木町	三ツ沢	花園橋	空港北
開通年	昭和 51 年	昭和 53 年	昭和 53 年	昭和 59 年	平成 5 年
換気方式	局所排気付送気型半横流※2	選択局所排気縦流	ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ付縦流	選択局所排気縦流	ﾌﾞｰｽﾀｰﾌｧﾝ付集中送排気縦流，ﾌﾞｰｽﾀｰﾌｧﾝ付縦流
延長	1,325 m	330 m	382 m	599 m	1,353 m
換気所数	2 か所	1 か所	1 か所	1 か所	1 か所

トンネル名	多摩川	川崎航路	並木	飛鳥山
開通年	平成 6 年	平成 6 年	平成 11 年	平成 14 年
換気方式	ｻｯｶﾙﾄﾞ付送排気縦流，ｻｯｶﾙﾄﾞ付集中排気縦流	ｻｯｶﾙﾄﾞ付送排気縦流，集中排気縦流	ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ付集中排気縦流	分散排気型縦流，集中排気縦流
延長	2,170 m	1,954 m	585 m	605 m
換気所数	2 か所	2 か所	1 か所	1 か所

トンネル名	新都心	大師	山手（新宿線区間）	山手（品川線区間）
開通年	平成 18 年	平成 22 年	平成 22 年	平成 27 年
換気方式	ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ付集中排気縦流	ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ付集中排気縦流	集中排気横流	ｼﾞｪｯﾄﾌｧﾝ付集中排気縦流
延長	2,900 m	1,060 m	9,735 m	8,400 m※3
換気所数	3 か所	1 か所	9 か所	4 か所

※1　トンネル構造物内に換気施設を設置

※2　排煙時は換気機を逆転運転

※3　トンネル区間の延長を示す

４．２　排煙量

横流換気方式における通常時の排気量を表－7 に示す．排気量は排出ガス規制前（1970 年頃）の勾配部での換気量が 0.5 $m^3/s\cdot m$，排出ガス規制施行中である 2000 年以降の平坦部における換気量が 0.1 $m^3/s\cdot m$ 程度であることを勘案し，その間の排気量を 0.1 $m^3/s\cdot m$ ごとに設定した．非常時にはこの排気量を排煙量とすることから，本章における検討では表－7 の排気量を用いた．なお，火災で発生した煙を排気する排煙口は，車両の進行方向左側車線の天井面に配置されているものとし，トンネル坑口から 5 m の地点より設置間隔は 10 m ピッチ [1)]で 45 個配置した．形状は矩形とし寸法は自動車の走行する方向から見て，横方向 2.5 m，奥行き方向 2.0 m，開口面積 5 m^2 とした．なお，排煙量に応じた一様風速を排煙口での境界条件として与えた．従って排煙する場合，トンネル内の縦流風速は位置によって変化することになる．

表－7　単位長さ当りの排気量の推移

排気量	備考
0.5 $m^3/s\cdot m$	450 m あたり 225 m^3/s，1 km あたり 500 m^3/s　※1
0.4 $m^3/s\cdot m$	450 m あたり 180 m^3/s，1 km あたり 400 m^3/s
0.3 $m^3/s\cdot m$	450 m あたり 135 m^3/s，1 km あたり 300 m^3/s　※2
0.2 $m^3/s\cdot m$	450 m あたり 90 m^3/s，1 km あたり 200 m^3/s
0.1 $m^3/s\cdot m$	450 m あたり 45 m^3/s，1 km あたり 100 m^3/s

※1　排出ガス規制前（1970 年頃）の勾配部（3%程度）での値 [26)]
※2　排出ガス規制前（1970 年頃）の平坦部での値 [26)]

シミュレーションケースは 225 m 及び 130 m 各々の発災地点において 3 種類の坑口間圧力差（0 Pa，5 Pa，10 Pa）と 5 種類の排煙量（0.1 $m^3/s\cdot m$，0.2 $m^3/s\cdot m$，0.3 $m^3/s\cdot m$，0.4 $m^3/s\cdot m$，0.5 $m^3/s\cdot m$）を設定した．また，ケース名を例えば F225_10Pa_q0.1 と表す．F225，0 Pa は前章と同様であり，排煙量を q0.1 と表すものとする．ケース数は自然換気状態を含め計 36 ケースである．火災発生の 60 秒前に事故あるいは故障が発生したものとし，火災発生時

を 0 秒，火災の感知及びトンネル換気施設の起動開始時間を 120 秒，最大排煙量となるまでの時間を 180 秒とした（図 - 31）.

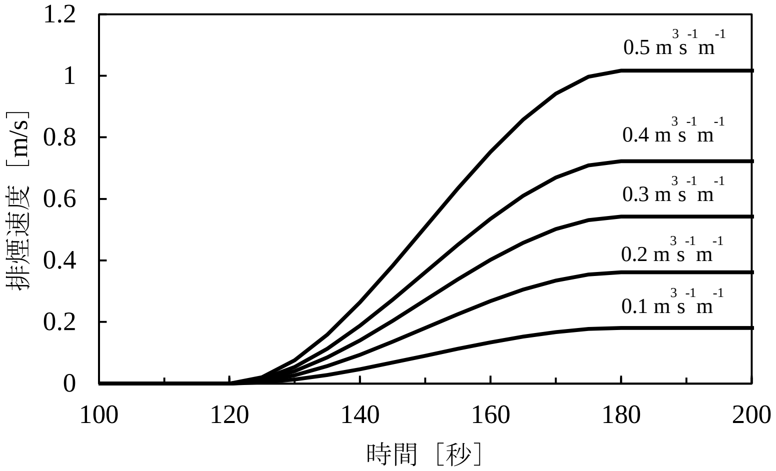
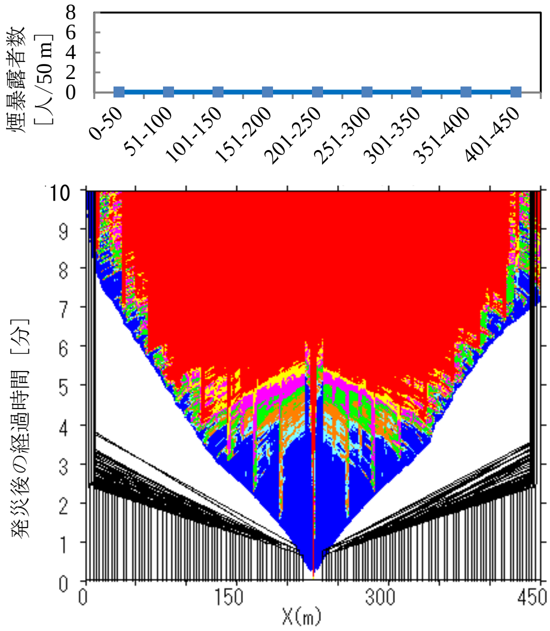


図 - 31　火災発生からの経過時間

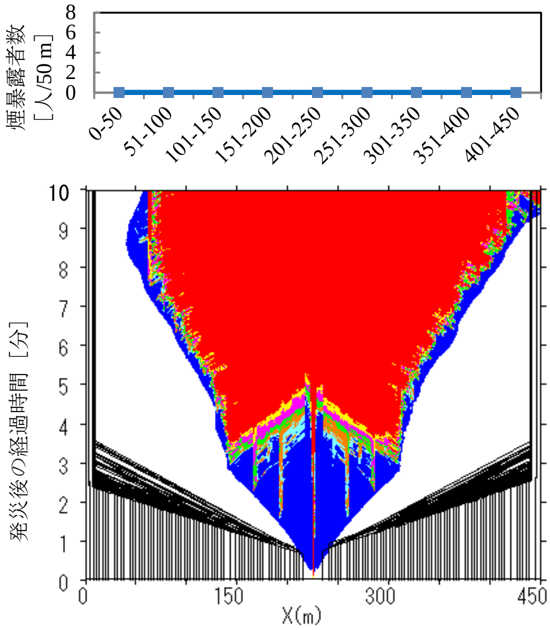
４．３　排煙時における安全性

４．３．１　発災地点 225 m

図 ‐ 32から図 ‐ 46は発災地点225 m，坑口間圧力差0 Pa，5 Pa，10 Paにおいて，排煙量を0.1 m^3/s･m，0.2 m^3/s･m，0.3 m^3/s･m，0.4 m^3/s･m，0.5 m^3/s･mとした場合の避難者行動マップである. 坑口間圧力差が0 Paのケースでは排煙を行わないケースF225_0Pa（図 ‐ 15）と同様，煙が発災地点を中心に両坑口に向かい拡がり，排煙量の増加に従いトンネル内に拡がる距離は短くなる傾向にある．また，坑口間圧力差が5 Paのケースにおいても，自然風の影響により煙が発災地点の右側に流される傾向は排煙を行わないケースF225_5Pa（図 ‐ 24）と同様であるが，排煙量が0.4 m^3/s･mのケース（図 ‐ 40）及び0.5 m^3/s･mのケース（図 ‐ 41）では，排煙開始後約3～4分程度で350 m付近にて煙の拡がりが停止している．坑口間圧力差が10 Paの場合，排煙量0.1 m^3/s･m（F225_10Pa_q0.1）（図 ‐ 42）及び排煙量0.2 m^3/s･m（F225_10Pa_q0.2）（図 ‐ 43）のケースでは，排煙量0 m^3/s･mの場合（図 ‐ 26）とほぼ同様に自然風の影響で煙が発災地点の右側に拡がるが，排煙により自然風が徐々に減速し出口坑口近くでは火災前の約0.6 m/sとトンネル中央部における風速1.2 m/sの半分程度に低下する．このため天井に沿う熱気流の進行速度が低下し，煙が路面近くに拡散しやすくなり，トンネル内利用者が煙に暴露されたことにより350～400 m付近で煙暴露者数が多く発生している．また，坑口からトンネルの外に煙が出る際には大きな浮力が作用し，煙が引っ張られることによりトンネル内の煙層の速度が増加することで層厚さが薄くなる．それにより坑口付近の避難環境が良くなるため，いずれのケースも401～500 mにおける煙暴露者数が減少していると考えられる．排煙量を0.3 m^3/s･mとしたケース（図 ‐ 44）では，出口坑口における平均縦流風速が負になり逆流するため煙が到達する時間が遅れ，トンネル利用者が煙に暴露される煙濃度（*Cs*濃度0.4 m^{-1}，路面からの煙の高さ1.5 m，緑と橙のエリア境）が400 m地点に到達する時間も排煙量0.1 m^3/s･mに比べ1分程度遅延している．発災から5分経過すると火勢が大きくなるため，右側上り勾配部での熱気流（煙）の浮力が増加し，徐々に縦流風速が増加し始め，7分経過時に煙が坑口に達する．この到達時間は図 ‐ 42と比べると5分程度遅くなる．さらに排煙量が0.4 m^3/s･mの場合（図 ‐ 45）では更に排煙の効果が高まり，発災後10分を経過した段階でも400 m付近で煙の拡がりは抑制されており出口坑口まで達しない結果となっている．この傾向は排煙量が0.5 m^3/s･mのケース（図 ‐ 46）でも同様である．



図‐32　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.1



図‐33　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.2

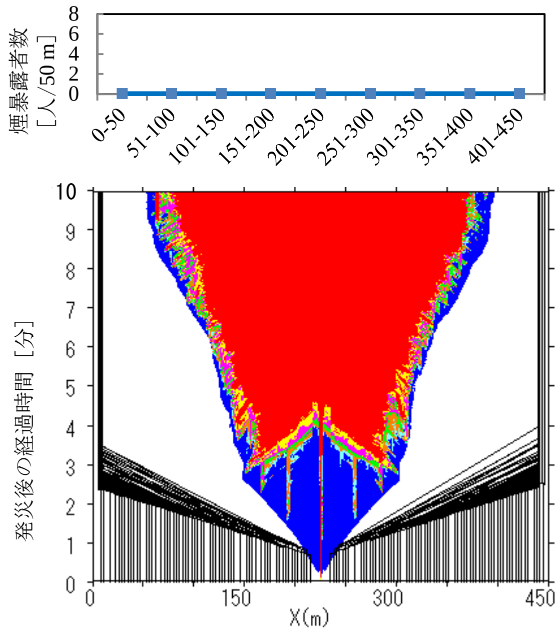


図 - 34　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.3

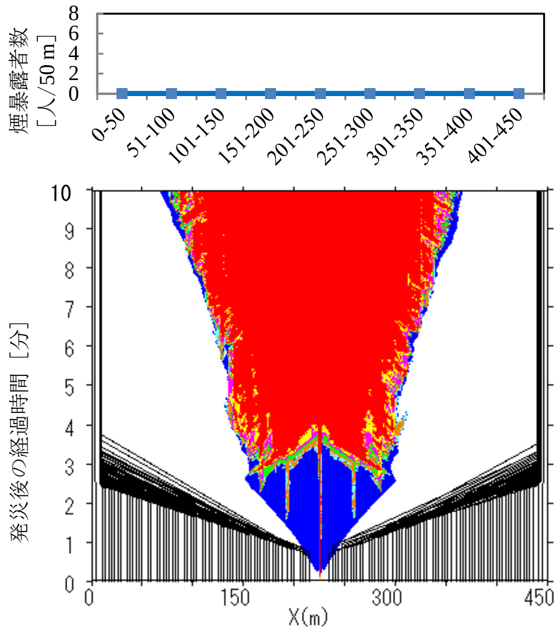


図 - 35　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.4

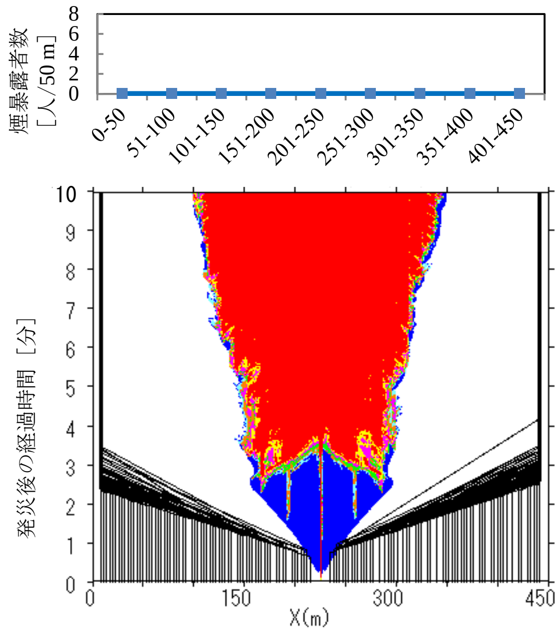
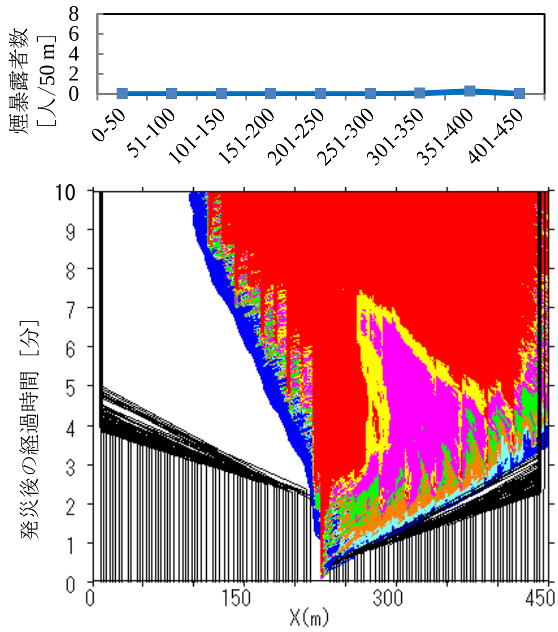
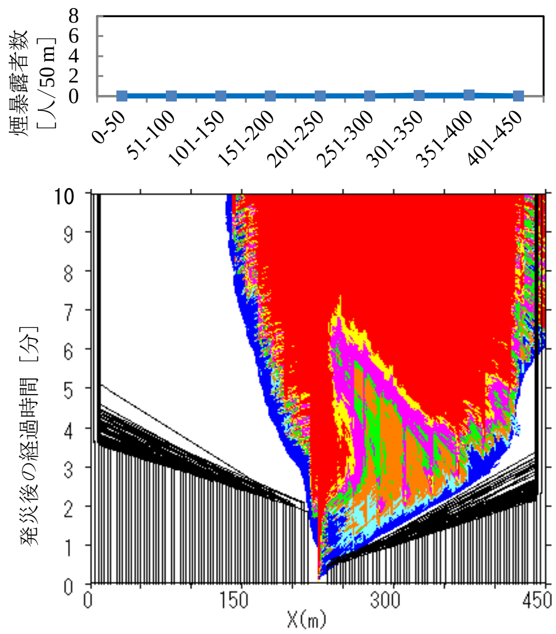


図 - 36　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.5



図‐37　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.1



図‐38　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.2

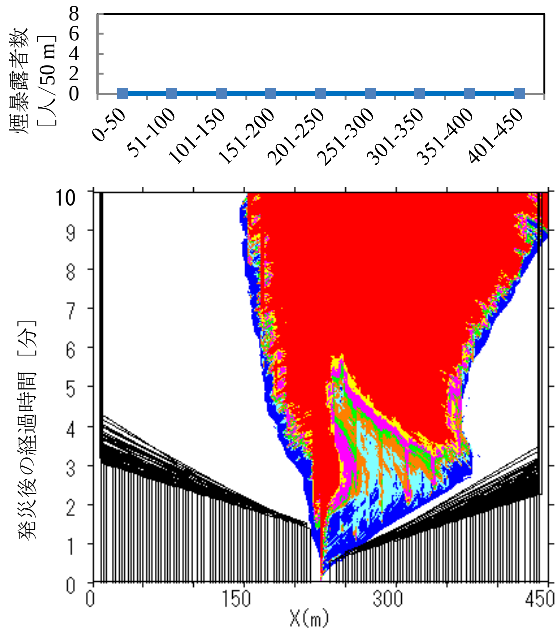


図 - 39　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.3

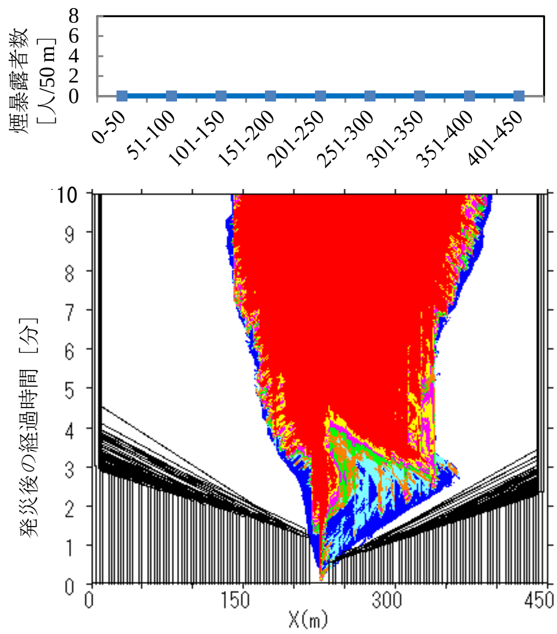
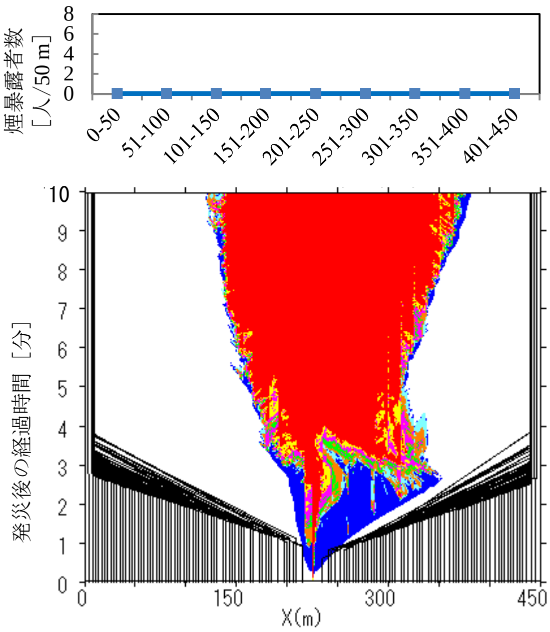
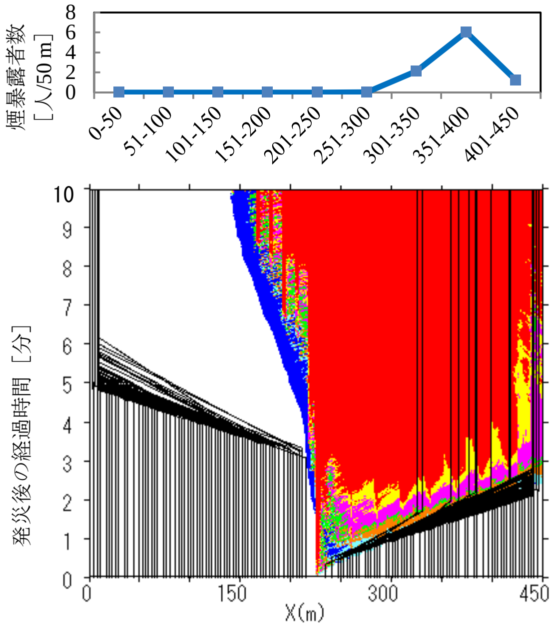


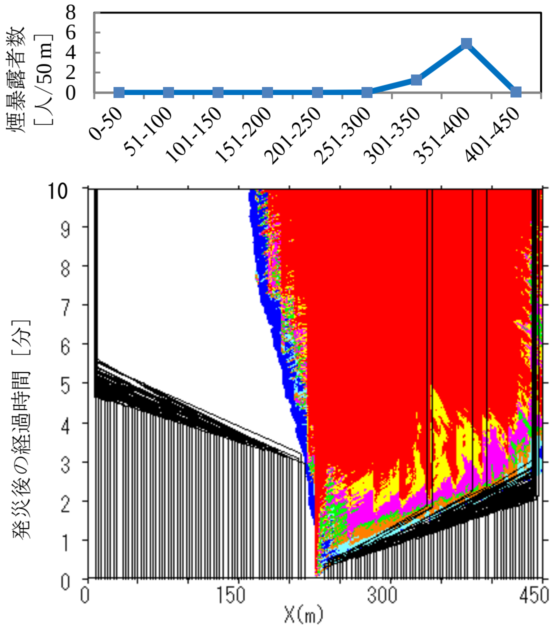
図 - 40　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.4



図－41　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.5



図－42　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.1



図－43　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.2

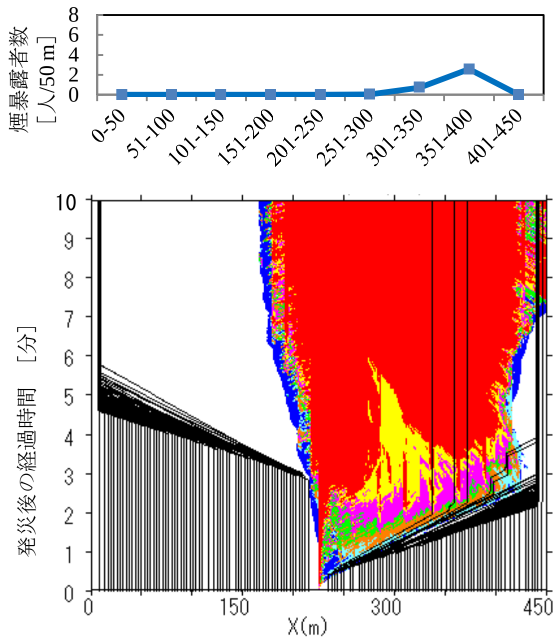


図 - 44　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.3

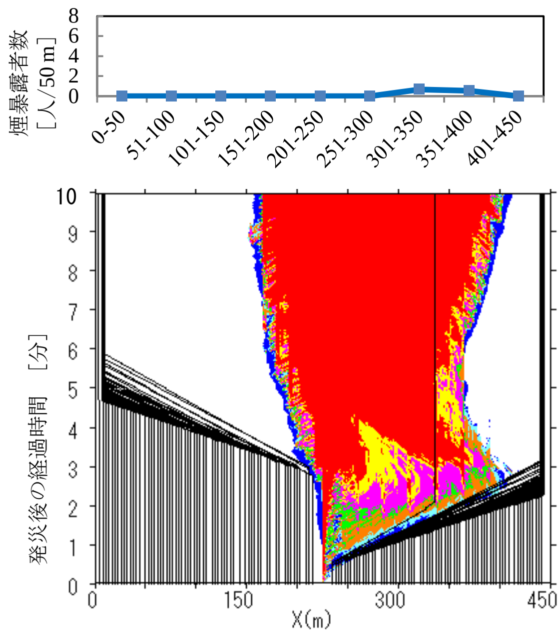


図 - 45　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.4

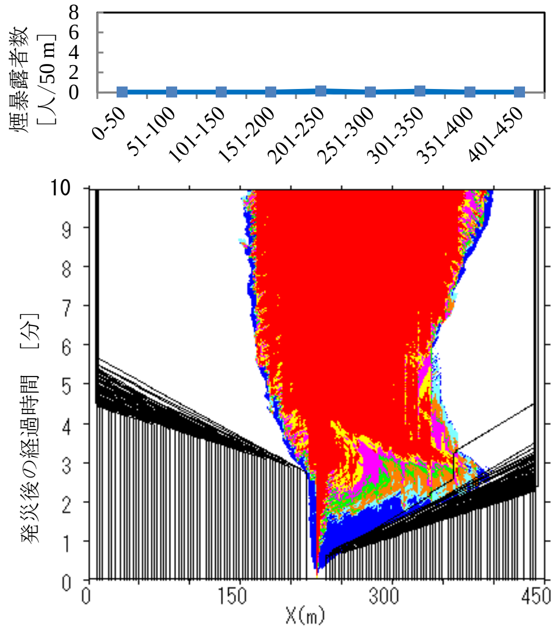


図 - 46　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.5

平均煙暴露者数の算定結果を表 - 8，図 - 47に示す．坑口間圧力差が5 Paの場合，排煙量が0.1 m^3/s･mまでは排煙を行わない自然換気状態とほぼ同様であるが，排煙量0.3 m^3/s･mを境に煙暴露者数は大きく減少する．また，坑口間圧力差が10 Paのケースでは，排煙量が大きくなるにつれて煙暴露者数が減少し，排煙量が0.3 m^3/s･m（図 - 44）では入口から350 mから400 m付近で発生が見られるものの排煙を行わない自然換気状態（図 - 26）に比べると煙暴露者数が70%以上減少している．また，排煙量が0.4 m^3/s･mから0.5 m^3/s･mの間でほぼ0に近づくことがわかる．

表 - 8　排煙施設を設置した場合の平均煙暴露者数（発災地点225 m）

坑口間圧力差 / 排気量	0 Pa（0 m/s）	5 Pa（0.85 m/s）	10 Pa（1.2 m/s）
0 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.537（0 / 0.537）	14.135（0 / 14.136）
0.1 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.379（0 / 0.379）	9.414（0 / 9.414）
0.2 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.120（0 / 0.120）	6.169（0 / 6.169）
0.3 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.004（0 / 0.004）	3.342（0 / 3.342）
0.4 m^3/s･m	0（0 / 0）	0（0 / 0）	1.210（0 / 1.210）
0.5 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.001（0 / 0.001）	0.228（0.124 / 0.104）

※（発災地点上流側の人数/発災地点下流側の人数）

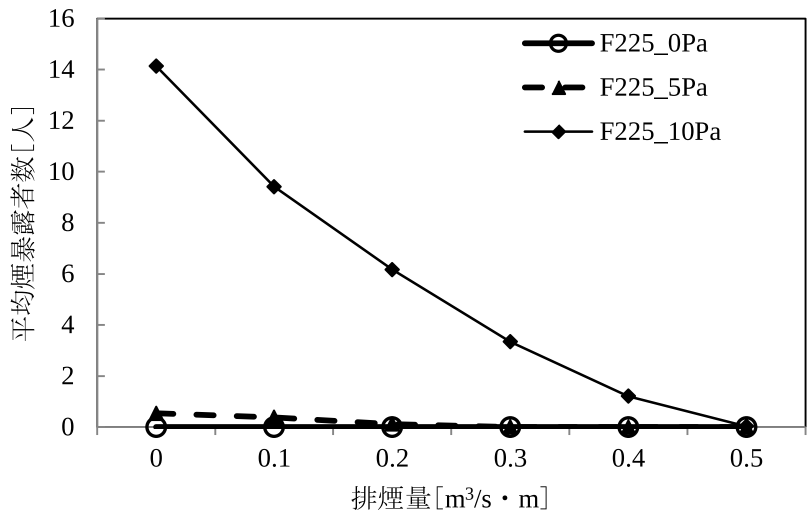
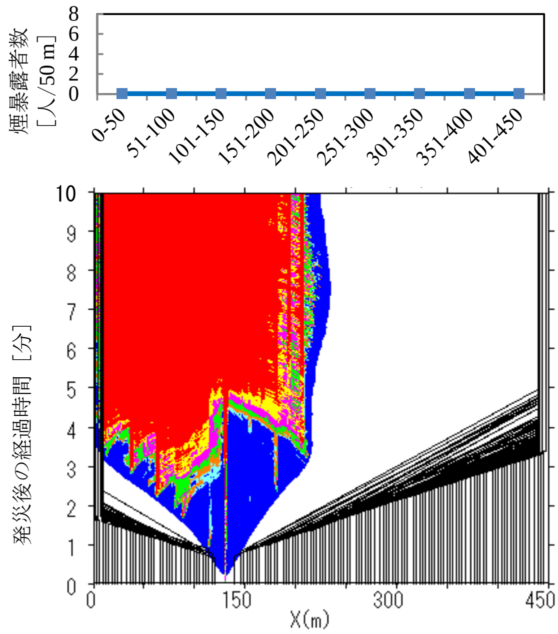


図 - 47　排煙時における平均煙暴露者数（発災地点225 m）

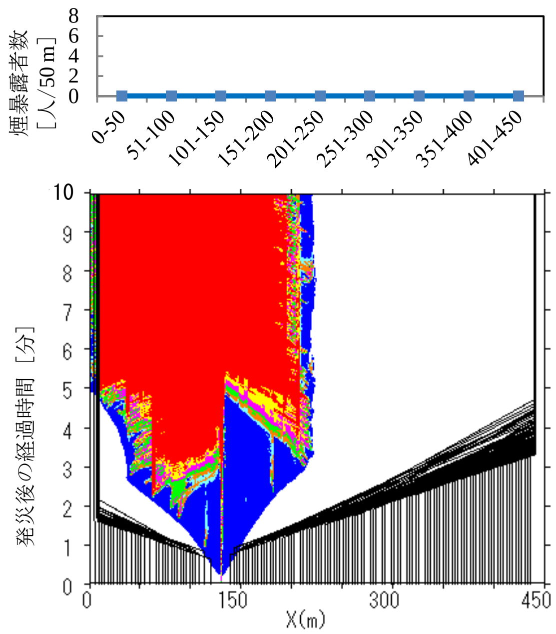
４．３．２　発災地点130 m

図 - 48から図 - 62は発災地点130 m，坑口間圧力差0 Pa，5 Pa，10 Paにおいて，排煙量を0.1 m^3/s･m，0.2 m^3/s･m，0.3 m^3/s･m，0.4 m^3/s･m，0.5 m^3/s･mとした場合の避難者行動マップである．坑口間圧力差が0 Paのケースでは，排煙を行わないケースF130_0Pa（図 - 27）で見られた下り勾配を起因とする図の左側への煙の遡上及びトンネル中央部付近での煙の進行停止という傾向はほぼ同様である．しかし，排煙量が増加するにつれ入口坑口からトンネルへ中央部に向かって車道内風速が増加するため，下り勾配部では煙の遡上が抑制されトンネル内の環境が改善されている．坑口間圧力差が5 Paのケースにおいては，排煙を行わないケースF130_5Pa（図 - 28）と同様，自然風の影響により発災地点の右側に煙が拡散する．

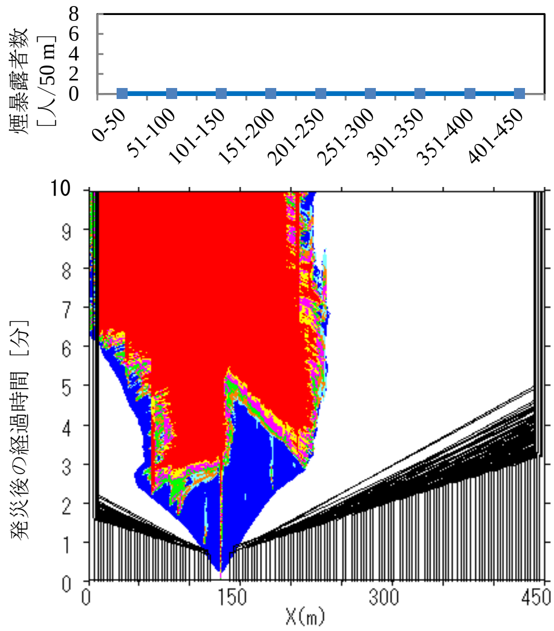
しかし，排煙量が0.3 m^3/s･m以上の場合（図 - 55，図 - 56，図 - 57），排煙及び排煙による出口坑口から逆流する縦流風の効果で300 m付近にて煙の拡がりが停止しており，発災後10分を経過した時点でもその傾向は変わらない．坑口間圧力差が10 Paの場合，F130_10Pa_q0.1（図 - 58）のケースでは自然換気状態の場合の煙の挙動（図 - 29）とほぼ同様であり，排煙を行っているもののトンネル内の避難環境に改善効果は見られない．これは排煙の効果よりも自然風の影響が勝っていることを示している．排煙量を0.3 m^3/s･mとしたケース（図 - 60）では煙の挙動が大きく変化し，出口側への煙の到達が抑制され，300 m付近では*Cs*濃度0.4 m^{-1}（路面からの高さ1.5 m）の煙が到達する時間が図 - 58に比べて2分程度も遅くなっている．



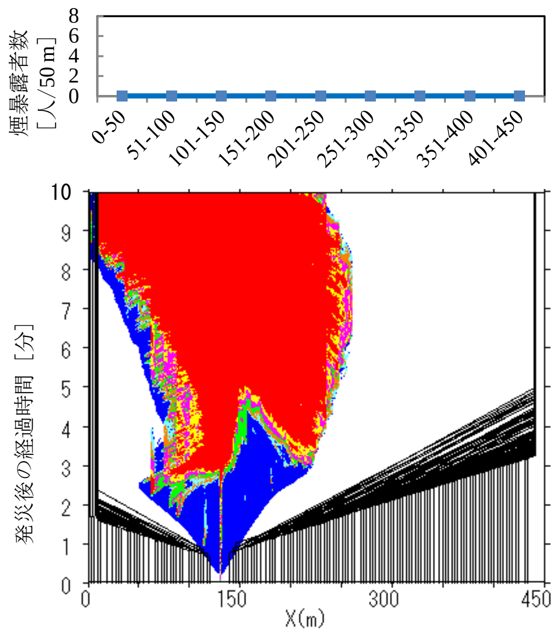
図－48　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.1



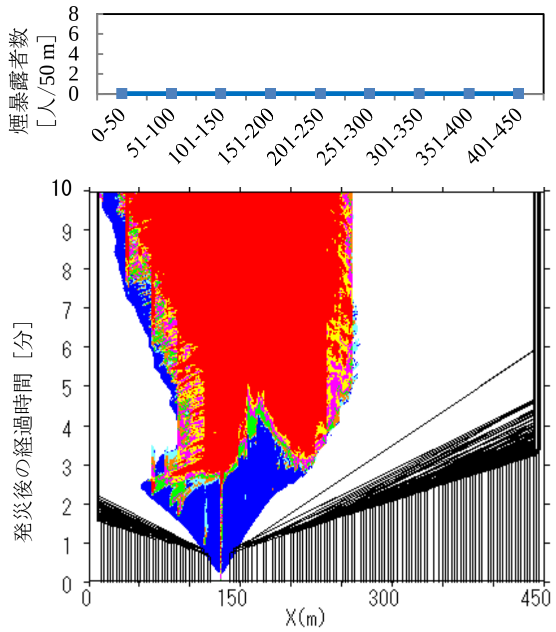
図－49　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.2



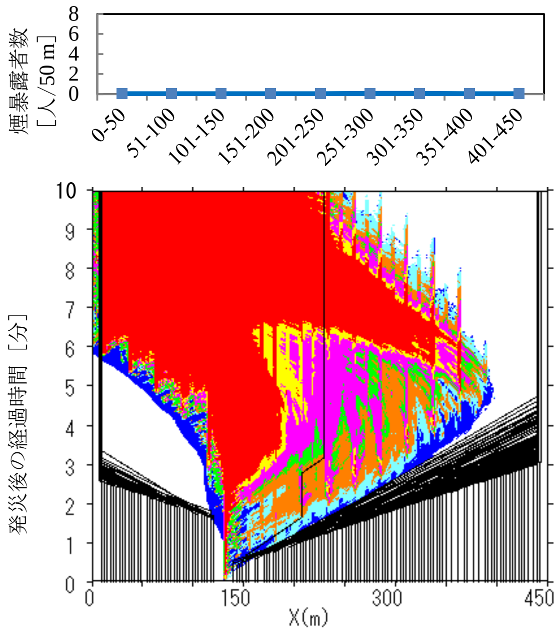
図－50　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.3



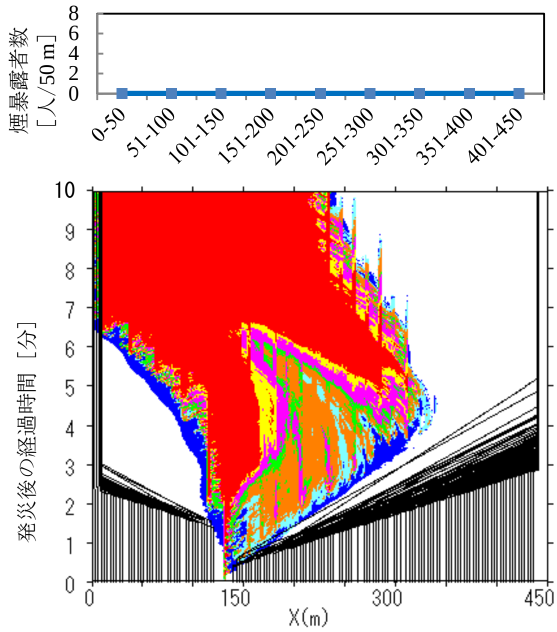
図－51　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.4



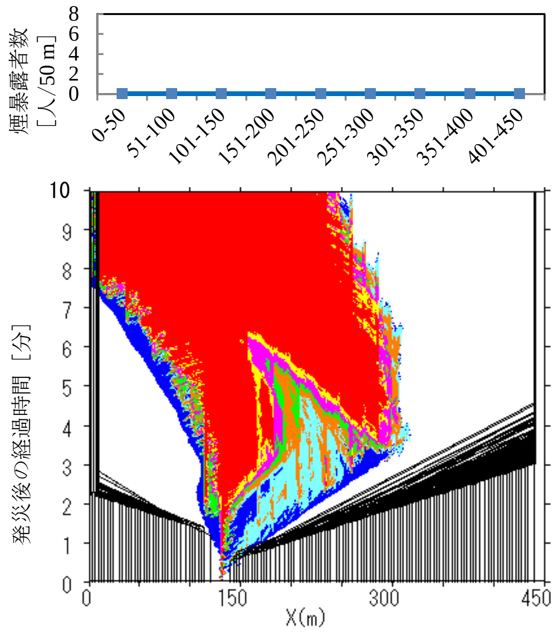
図－52　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.5



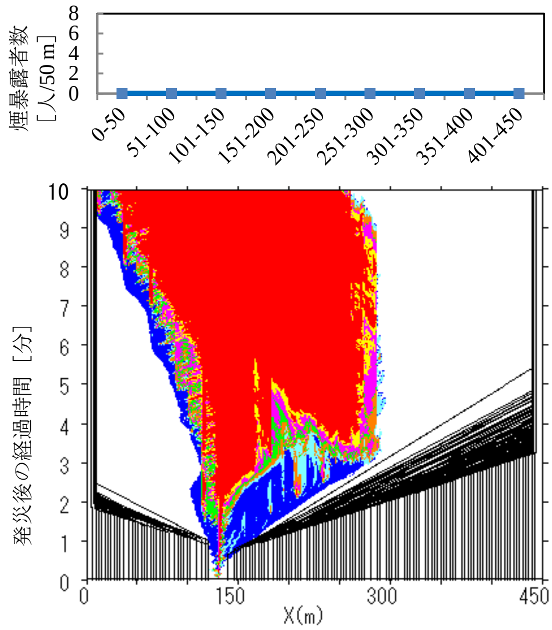
図－53　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.1



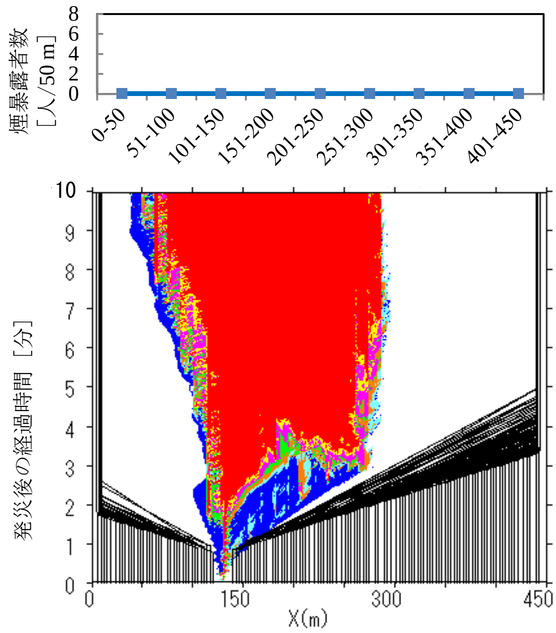
図－54　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.2



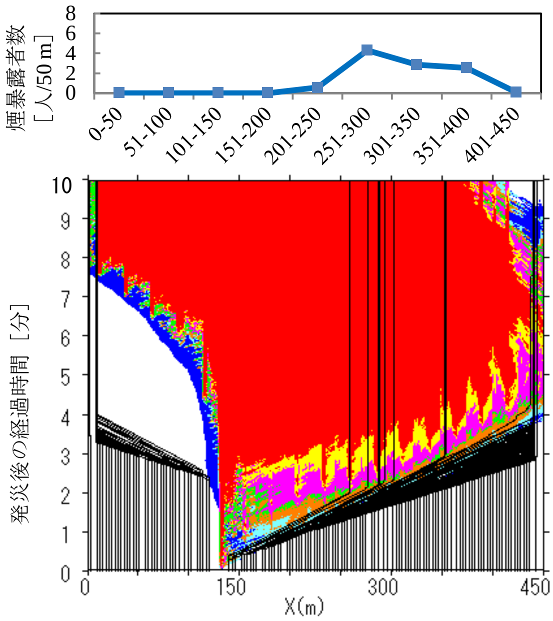
図－55　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.3



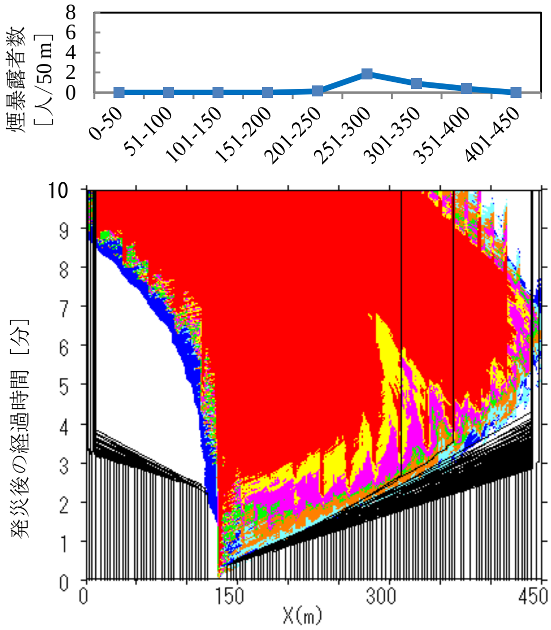
図－56　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.4



図－57　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.5



図－58　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.1



図－59　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.2

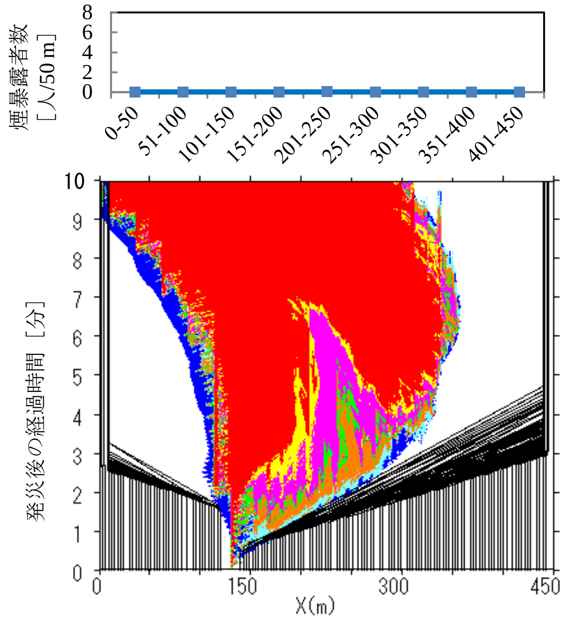


図 - 60　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.3

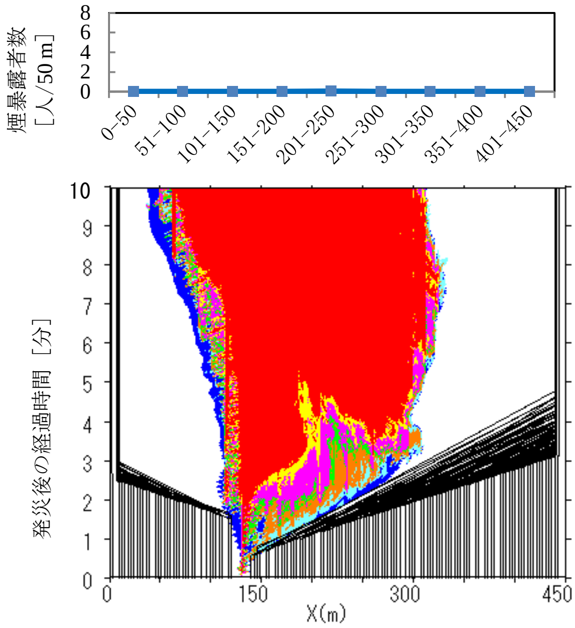
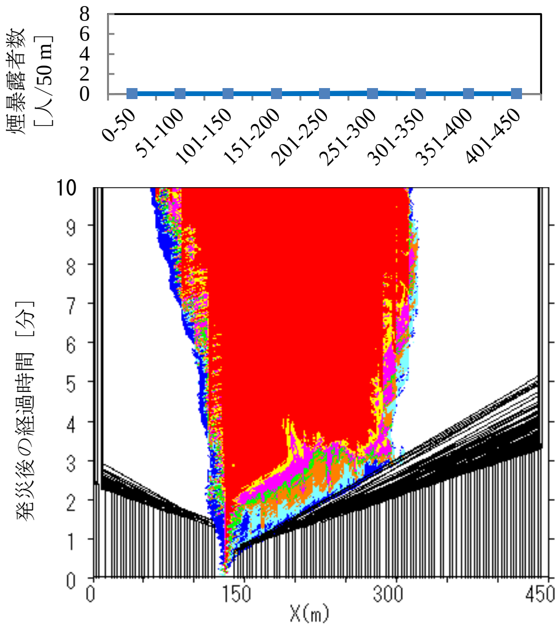


図 - 61　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.4



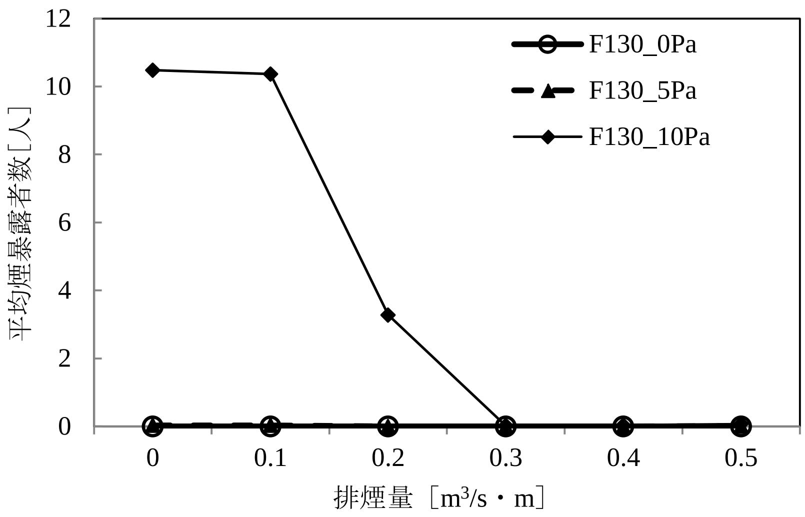
図‐62　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.5

また，平均煙暴露者数（表 - 9，図 - 63）についても排煙量が増加するに従い減少する．特に坑口間圧力差が10 Paでは排煙の効果が大きく, 0.3 m^3/s･m以上の排煙量では煙暴露者数は急激に減少する．この結果は排煙により煙の拡がりが抑制されトンネル内利用者の避難時の環境が良好に確保されていることを示している．よって，発災地点が130 mの場合，実際のトンネルで通常発生しうる1.2 m/s程度の自然風（坑口間圧力差が10 Pa）の状況では，排煙量が0.3 m^3/s･m以上であれば火災時の安全性が確保可能であると考えられる．

表 - 9　排煙施設を設置した場合の平均煙暴露者数（発災地点 130 m）

排気量＼坑口間圧力差	0 Pa（0 m/s）	5 Pa（0.85 m/s）	10 Pa（1.2 m/s）
0 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.032（0 / 0.032）	10.480（0 / 10.480）
0.1 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.03（0 / 0.03）	10.366（0 / 10.366）
0.2 m^3/s･m	0（0 / 0）	0（0 / 0）	3.277（0 / 3.277）
0.3 m^3/s･m	0（0 / 0）	0（0 / 0）	0.021（0 / 0.021）
0.4 m^3/s･m	0（0 / 0）	0（0 / 0）	0.036（0 / 0.036）
0.5 m^3/s･m	0（0 / 0）	0.009（0 / 0.009）	0.069（0 / 0.069）

※（発災地点上流側の人数/発災地点下流側の人数）



図－63　排煙時における平均煙暴露者数（発災地点130 m）

４．３．３　発災地点による比較

発災地点が 225 m と 130 m の場合，煙の挙動と煙暴露者数には傾向の違いがある．いずれのケースも自然風の影響により火災で発生した煙が発災地点の右側に拡がって行く傾向は同様であるが，130 m の場合は発災地点の道路縦断勾配が下り勾配（-4%）であるため，火災で発生した煙が左側に遡上し（図‐29），自然風による発災地点右側への煙の拡がりを抑制している．これは 225 m の場合に比べ，発災地点から出口側のトンネル利用者に煙が追いつきづらいことを示している．一方，225 m の場合は，道路縦断勾配が平坦な状況（0%）から 350 m 付近で上り勾配（4%）となるため自然風による煙の拡散に抵抗となる要因が無い（図‐26）．このため，煙の拡がりが促進され避難の途中で煙に巻かれるトンネル利用者が多いと考えられる．このように，発災地点により煙暴露者数の発生する傾向に若干の相違が見られるが，いずれの発災地点においても坑口間圧力差が 10 Pa 程度の自然風が存在するだけでトンネル内の避難環境が急激に悪化する状況は同様である．また，排煙を行わない場合及び 0.1 $m^3/s\cdot m$ 程度の排煙を行った場合では，トンネル利用者の安全性を向上させることは困難であるが，0.3 $m^3/s\cdot m$ 以上の排煙は煙暴露者数を大きく減少させる効果がある．

以下に本章の結果をまとめる．

換気施設による排煙を行う場合，

・排煙量0.1 $m^3/s\cdot m$では，排煙の効果はほとんど見られなかった．

・トンネル内に自然風が存在する場合でも，排煙量が0.3 $m^3/s\cdot m$以上の排煙量とすると，避難環境を維持することが出来，効果的である．

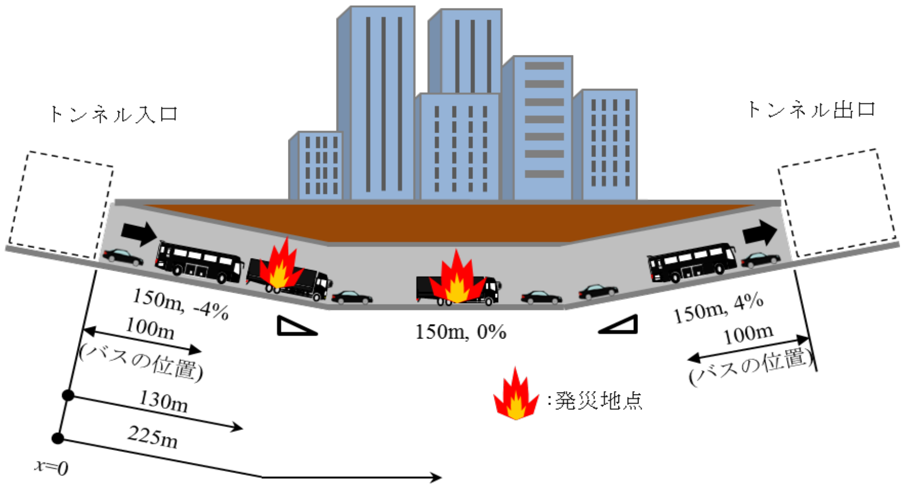
ゆえに，自然風を有する場合においても一定規模の排煙はトンネル内の安全性を確保するために有効である．

５．排煙の効果（バスが存在する場合）

前章では自然風が存在する場合でも，排煙量を0.3 m^3/s･m以上確保することで煙暴露者数が大幅に削減することを確認した．さらに本章ではトンネル内の利用者数が多くなるバスが存在するケースを想定し，この場合における排煙の有効性について検証した．

５．１　条件

検討に際し，図－64 のとおりバスを両坑口から 100 m の地点に配置した．なお，バスの定員は 50 人/台である．また，シミュレーションケースは 225 m 及び 130 m 各々の発災地点において 3 種類の坑口間圧力差（0 Pa，5 Pa，10 Pa），5 種類の排煙量（0 m^3/s･m，0.1 m^3/s･m，0.2 m^3/s･m，0.3 m^3/s･m，0.4 m^3/s･m，0.5 m^3/s･m）を設定した．また，ケース名はこれまでと同様，F225_10Pa_q0.1_bus などと表す．F225，0Pa，q0.1 は前章と同様であり，バスの存在を bus と表すものとする．ケース数は計 36 ケースである．なお，トンネル構造，解析領域，バスが存在する場合のトンネル内渋滞車両の利用者総数（平均 272.8 人）を除く交通条件，火災発生時の条件，避難行動の定義とモデル，排煙方式，排煙量については，前章と同条件とした．



図－64　モデルトンネル概要図（バスが存在するケース）

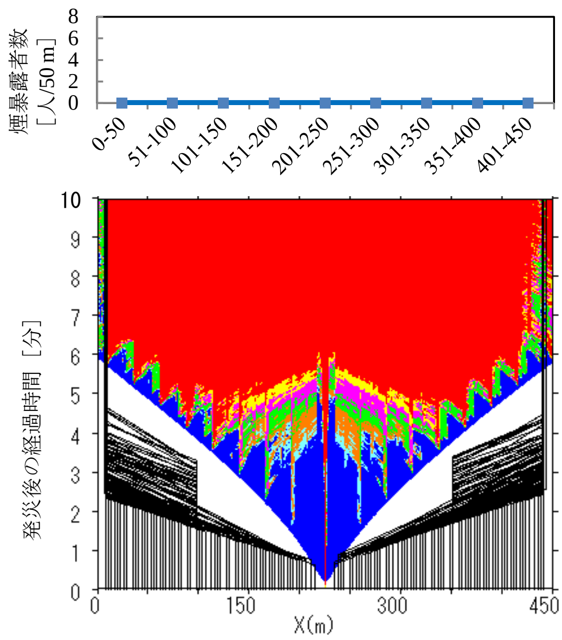
５．２　排煙時における安全性

５．２．１　発災地点 225 m

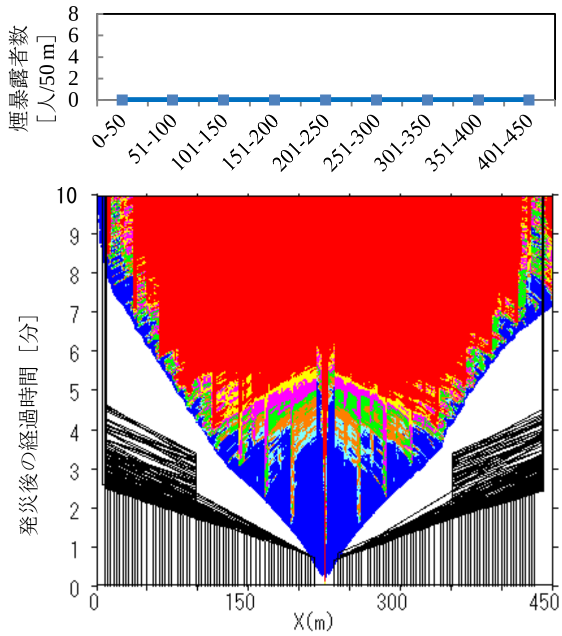
図‐65 から図‐70 は，坑口間圧力差が 0 Pa において排煙量を 0 $m^3/s\cdot m$，0.1 $m^3/s\cdot m$，0.2 $m^3/s\cdot m$，0.3 $m^3/s\cdot m$，0.4 $m^3/s\cdot m$，0.5 $m^3/s\cdot m$ とした場合の避難行動マップである．F225_0Pa_bus（図‐65）のケースでは，バスを含むトンネル利用者は発災から 5 分以内で両坑口に拡がる煙に巻かれずに避難が完了している．また，排煙を行うことでトンネル内に拡がる煙の領域は徐々に小さくなることから，利用者の避難環境はさらに向上している．

坑口間圧力差が 5 Pa の場合（図‐71，図‐72，図‐73，図‐74，図‐75，図‐76），自然風の影響により発災地点から図の右側に煙が流されるため，排煙量が 0.3 $m^3/s\cdot m$（F225_5Pa_q0.3_bus）（図‐74）以下の場合，発災後 2 分から 3 分程度でバスが存在している 350 m 付近で煙暴露者数が多く発生している. 排煙量を 0.4 $m^3/s\cdot m$（F225_5Pa_q0.4_bus），0.5 $m^3/s\cdot m$（F225_5Pa_q0.5_bus）（図‐75，図－76）とした場合，排煙の効果と出口坑口からの縦流風の逆流により煙は 300～350 m 付近で停止することから煙暴露者数はほとんどみられない. 坑口間圧力差 10 Pa の場合の避難行動マップを図‐77, 図‐78, 図‐79, 図‐80, 図‐81，図‐82 に示す．F225_10Pa_q0.1_bus（図‐78）及び F225_10Pa_q0.2_bus（図‐79）の場合，排煙を行っているものの発災地点から出口坑口にかけて縦流風速の低下により路面近くまで煙が降下するため，バスの存在する 350 m 付近から出口坑口の間で多くの煙暴露者数が発生している．F225_10Pa_q0.3_bus（図‐80）のケースでは，400 m 付近から出口坑口にかけて，排煙による発災地点の方向（負の方向）に風が流れる効果により，自然風の影響が小さくなり，この区間に存在する利用者は煙に追いつかれずに避難を行うことが出来ている．しかし，バスの存在する 350 m 付近では煙の拡がり方は F225_10Pa_q0.2_bus（図‐79）と同様の傾向を示しており，2 分程度で多くの利用者が煙に暴露されている．この傾向は排煙量を 0.4 $m^3/s\cdot m$ としたケース（図‐81）でも同様である．

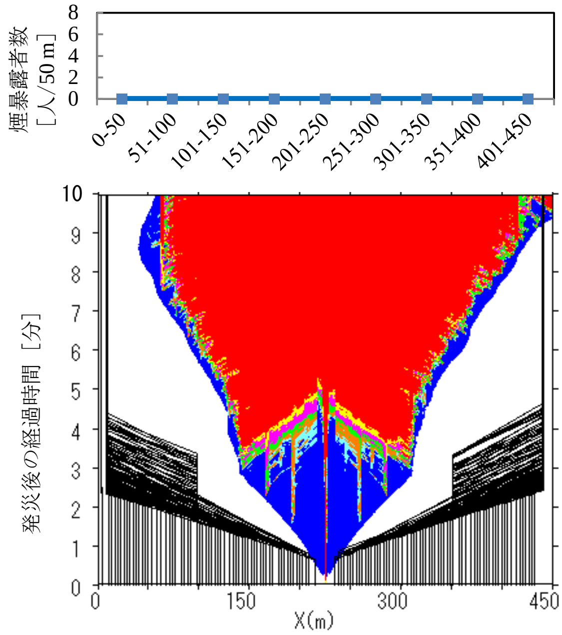
排煙量が 0.5 $m^3/s\cdot m$（F225_10Pa_q0.5_bus）（図‐82）では，排煙の効果と出口坑口からの逆流区間の拡大により，バスの存在する 350 m 付近においてもトンネル利用者が煙に暴露される煙濃度（*Cs* 濃度 0.4 m^{-1}，路面からの煙の高さ 1.5 m，緑と橙のエリア境）が出現していない.



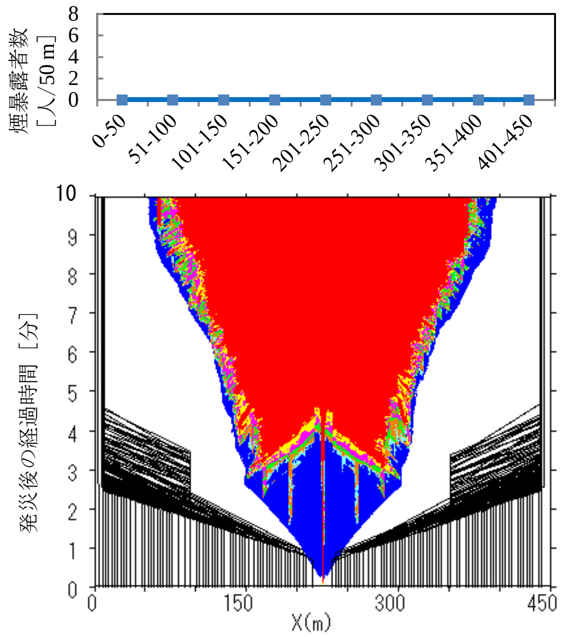
図－65　避難者行動マップ　F225_0Pa_bus



図－66　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.1_bus



図－67　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.2_bus



図－68　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.3_bus

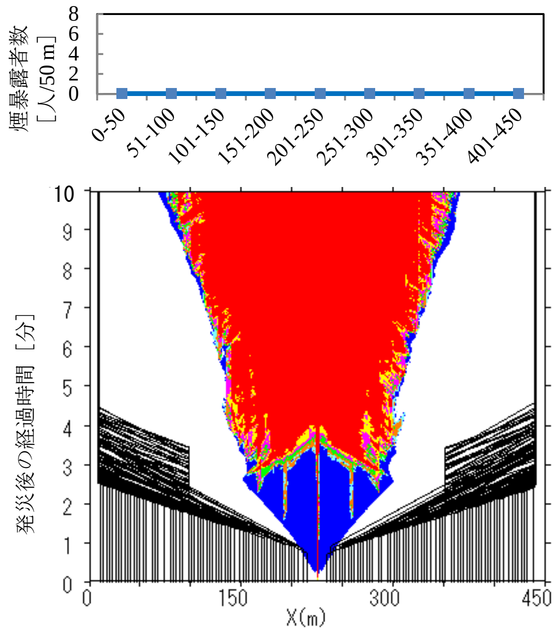


図 - 69　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.4_bus

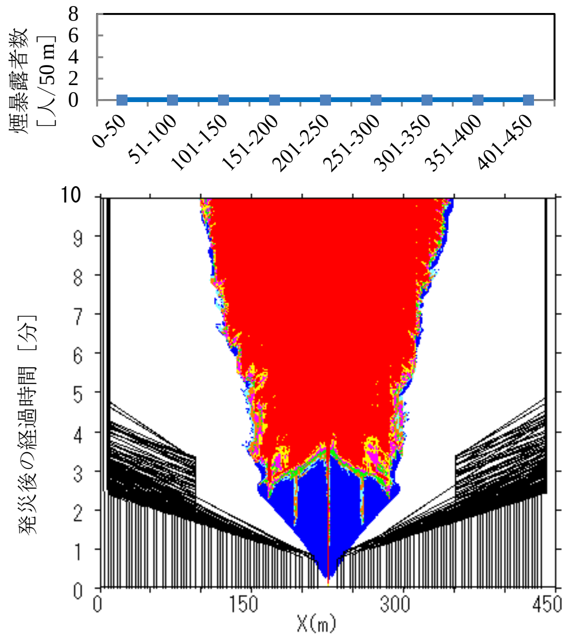


図 - 70　避難者行動マップ　F225_0Pa_q0.5_bus

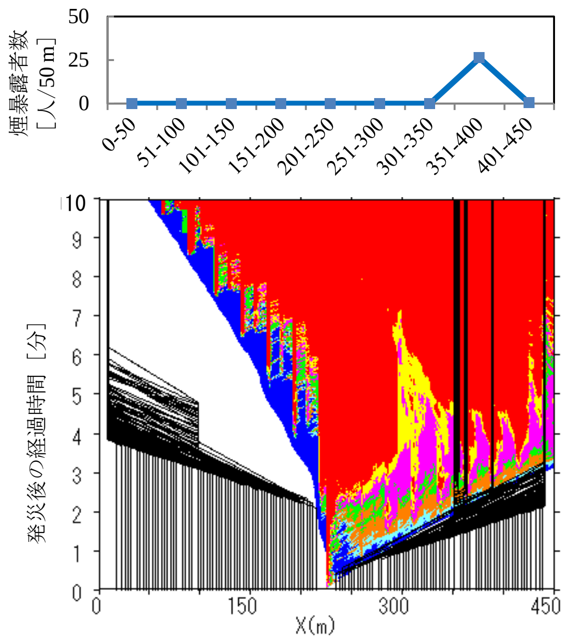


図 - 71　避難者行動マップ　F225_5Pa_bus

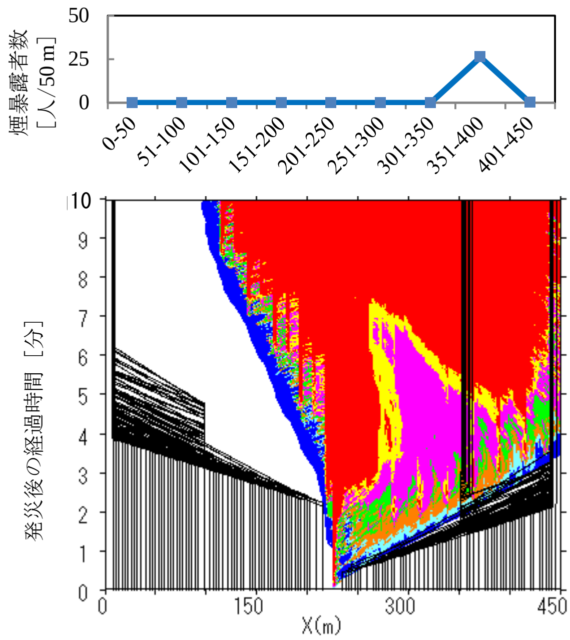
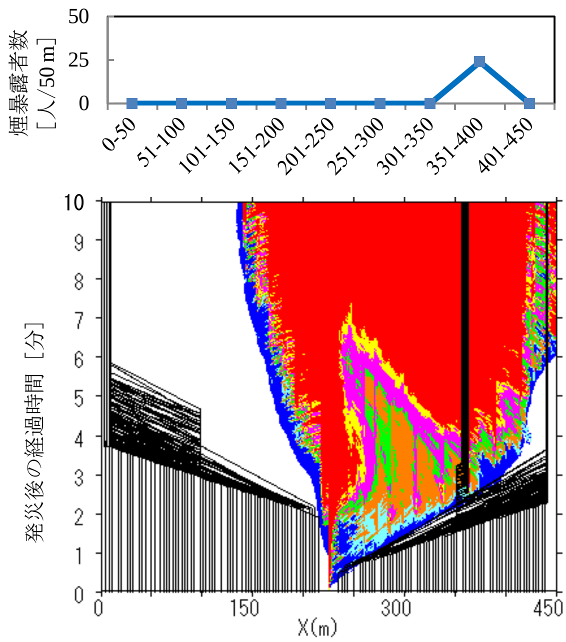
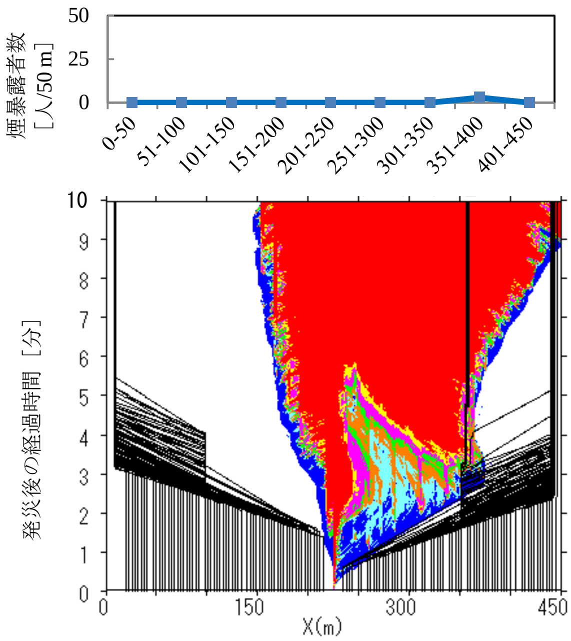


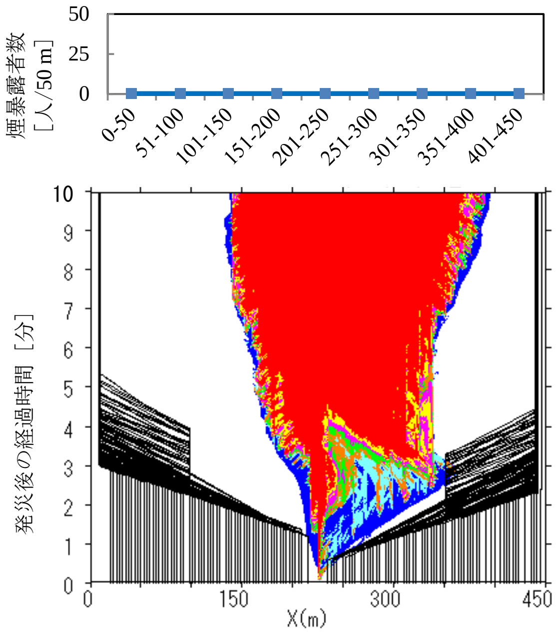
図 - 72　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.1_bus



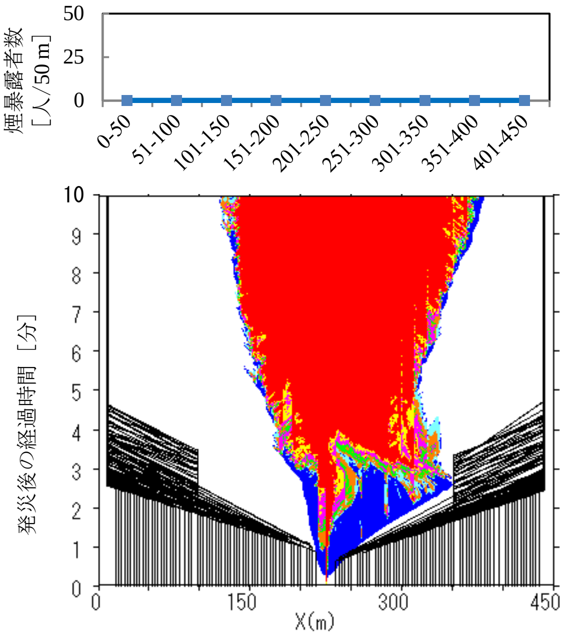
図－73　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.2_bus



図－74　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.3_bus



図－75　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.4_bus



図－76　避難者行動マップ　F225_5Pa_q0.5_bus

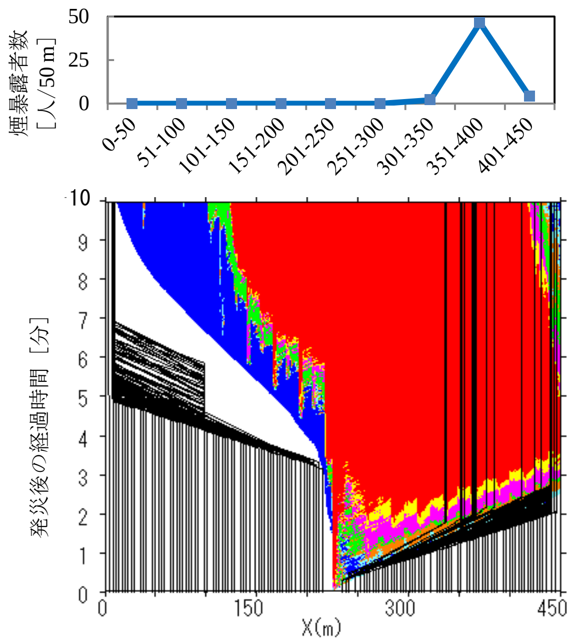


図 - 77　避難者行動マップ　F225_10Pa__bus

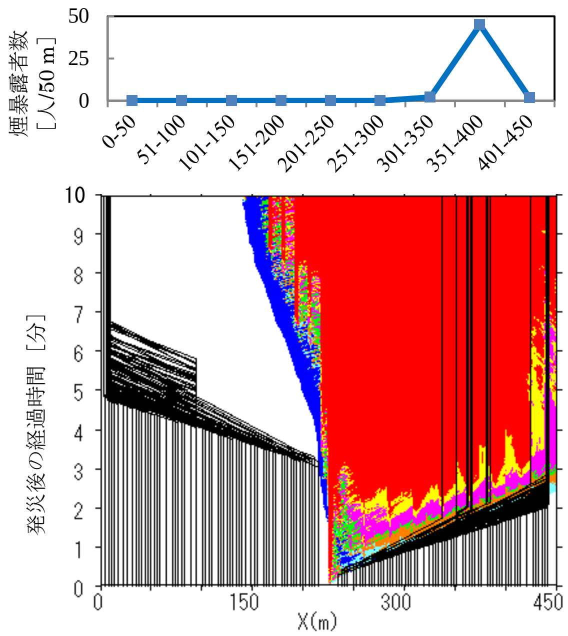


図 - 78　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.1_bus

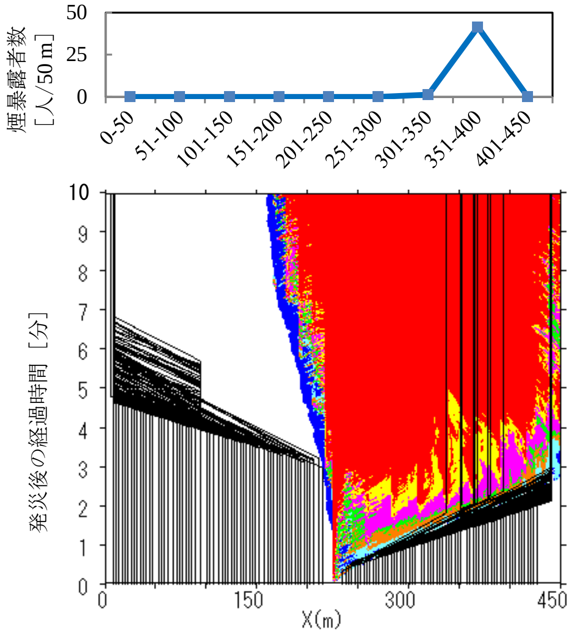


図 - 79　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.2_bus

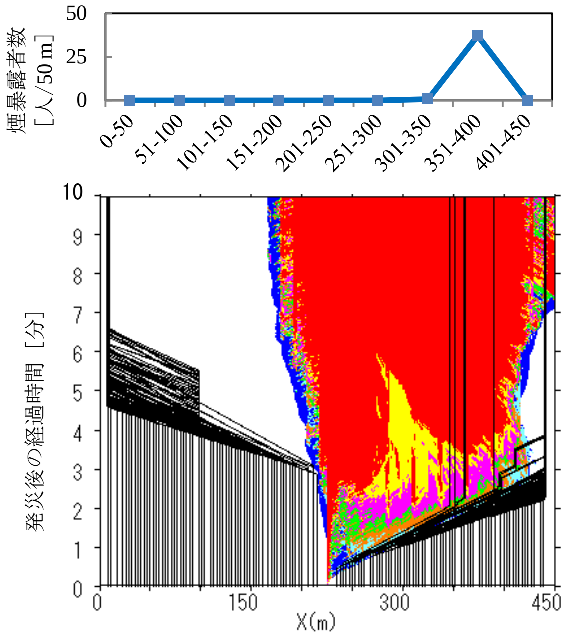


図 - 80　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.3_bus

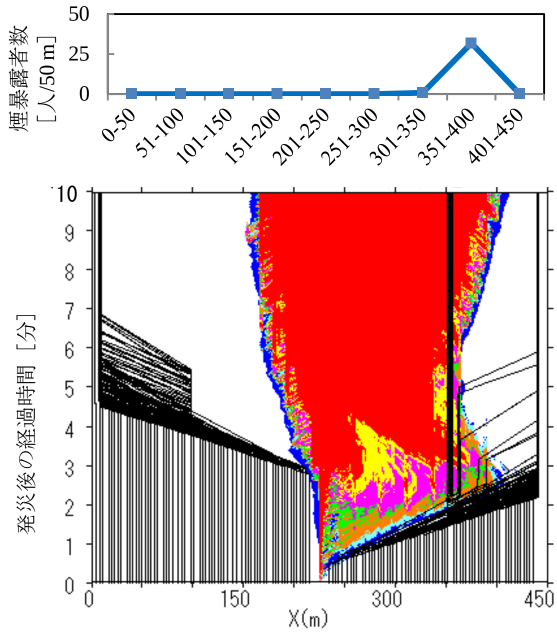


図 - 81　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.4_bus

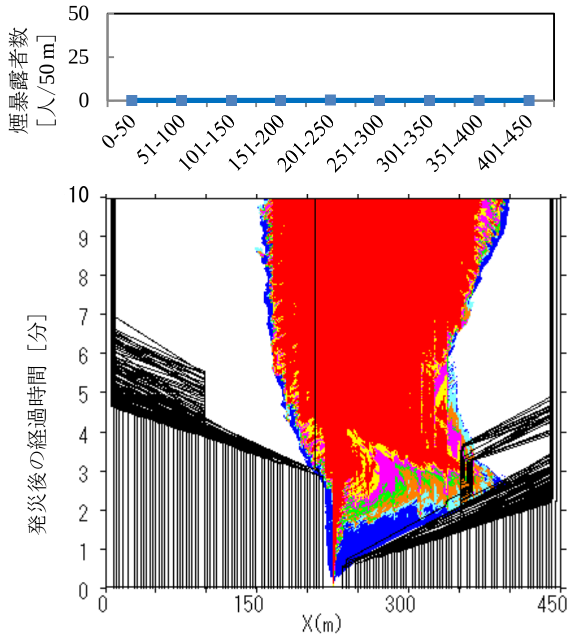


図 - 82　避難者行動マップ　F225_10Pa_q0.5_bus

表－10，図－83に本ケースにおける平均煙暴露者数を示す．坑口間圧力差が0 Pa（0 m/s）の場合はバスが存在しないケースと同様に煙暴露者数は発生していない．しかし，坑口間圧力差が5 Pa（0.85 m/s）ではバスが存在しないケースにおいて1人未満であった煙暴露者数が，F225_5Pa_q0.2_bus（図－73）以下のケースで20人以上発生している．F225_5Pa_q0.3_bus（図－74）にて3人程度まで減少し，排煙量が0.4 $m^3/s\cdot m$（F225_5Pa_q0.4_bus）（図－75）とした場合にようやく煙暴露者数がほとんど見られなくなる．坑口間圧力差が10 Pa（1.2 m/s）では，排煙を行わないケースや排煙量が0.1 $m^3/s\cdot m$（図－78）で50人前後の煙暴露者数が発生し，排煙量を0.2 $m^3/s\cdot m$（図－79），0.3 $m^3/s\cdot m$（図－80），0.4 $m^3/s\cdot m$（図－81）とした場合でも30%程度の減少にとどまっている．排煙量を0.5 $m^3/s\cdot m$（図－82）とした場合に煙暴露者数はほぼ0人となる．坑口間圧力差が10 Paの場合，バスが存在しないケースでは最も煙暴露者数の多い人数は排煙を行わない場合（F225_10Pa）の12人程度であり，排煙量を0.3 $m^3/s\cdot m$とすることで煙暴露者数は約3人まで減少するが，バスの存在する本ケースでは0.3 $m^3/s\cdot m$（図－80）で37人以上の煙暴露者数が生じており，その多くがバスの存在する350 m付近である．このように，トンネル内に乗車人数の多いバスが存在する場合，同じ坑口間圧力差による条件のもとでも，煙に暴露される人数が大幅に増加することがわかる．また，バスが存在する場合，排煙量は0.5 $m^3/s\cdot m$程度を確保することで，煙暴露者数の減少に効果があることがわかる．

表－10　排煙施設を設置した場合の平均煙暴露者数（バス有，発災地点225 m）

坑口間圧力差 ＼ 排気量	0 Pa (0 m/s)	5 Pa (0.85 m/s)	10 Pa (1.2 m/s)
0 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	26.646 (0 / 26.646)	52.432 (0 / 52.432)
0.1 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	26.306 (0 / 26.306)	48.810 (0 / 48.810)
0.2 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	23.985 (0 / 23.985)	42.682 (0 / 42.682)
0.3 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	3.034 (0 / 3.034)	37.880 (0 / 37.880)
0.4 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	0 (0 / 0)	32.503 (0 / 32.503)
0.5 $m^3/s\cdot m$	0 (0 / 0)	0.004 (0 / 0.004)	0.204 (0 / 0.204)

※（発災地点上流側の人数/発災地点下流側の人数）

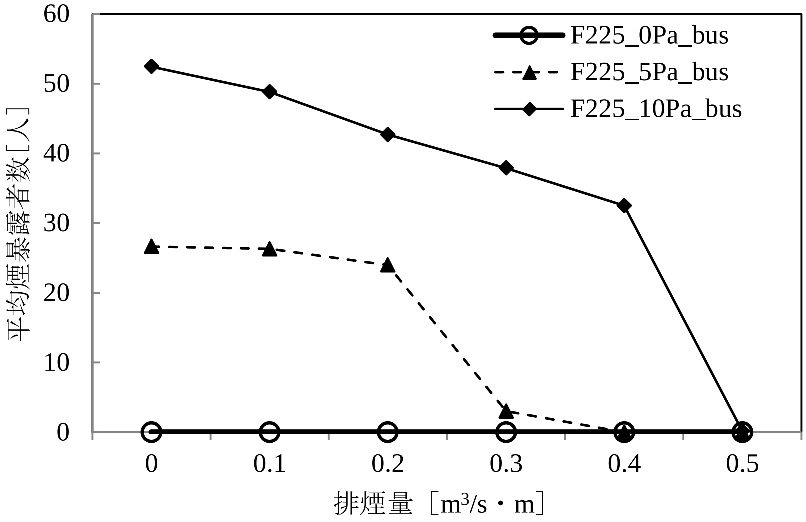


図 - 83　排煙時における平均煙暴露者数（発災地点225 m　バス有）

５．２．２　発災地点 130 m

発災地点 130 m における坑口間圧力差が 0 Pa の場合の避難行動マップを図‐84, 図‐85, 図‐86，図‐87，図‐88，図‐89 に示す．排煙量は各々0 m^3/s･m，0.1 m^3/s･m，0.2 m^3/s･m, 0.3 m^3/s･m，0.4 m^3/s･m，　0.5 m^3/s･m である．坑口間圧力差が 0 Pa の場合，入口側の下り勾配により煙は図の左側に遡上するため，排煙を行わない F130_0Pa_bus のケース（図－84）では入口坑口から 100 m 地点のバスから避難した利用者は発災から 3 分程度で煙に暴露されている．これは排煙量 0.4 m^3/s･m 以下のケースでも同様の傾向であり，排煙の効果よりも下り勾配による煙の遡上が勝っていることを示している．排煙量を 0.5 m^3/s･m（F130_0Pa_q0.5_bus）としたケース（図－89）では，排煙量の増加による入口坑口からトンネル中央部へ向かう縦流風速の増加により煙の遡上が抑制され，バスから避難した利用者は 5 分程度で入口坑口に避難することが出来ている. トンネル内に 0.85 m/s 程度の自然風がある坑口間圧力差 5 Pa の場合（図‐90，図‐91，図‐92，図‐93，図‐94，図‐95），図の右側に煙が流される傾向にあるが，排煙を行わない F130_5Pa_bus のケース（図‐90）では入口側のバスが存在するエリアで，下り勾配を起因とした煙の遡上による暴露が生じている．しかし，排煙量を 0.1 m^3/s･m（F130_0Pa_q0.1_bus）以上とした各ケースでは入口から発災地点の左側のエリアでは，自然風による出口坑口側への煙の移流と排煙の効果により，トンネル利用者が煙に暴露される煙濃度（*Cs* 濃度 0.4 m^{-1}，路面からの煙の高さ 1.5 m, 緑と橙のエリア境）の出現時間に遅れが生じ，入口坑口から 100 m に位置する利用者の多いバスの付近の付近においても十分な避難時間が確保されている.

坑口間圧力差が 10 Pa のケース（図‐96，図‐97，図‐98，図‐99，図‐100，図‐101）では，これまでの傾向と異なる．排煙を行わない F130_10Pa_bus のケース（図‐96）では, 発災地点の左側における下り勾配による煙の遡上と自然風の影響によりトンネル全体に煙が拡がっている．このため，発災地点左側のバス付近及び右側 300 m から出口坑口にかけて煙に暴露される利用者が生じている．発災地点左側のバス付近については，坑口間圧力差 5 Pa の場合と同様に排煙量が増加するにつれて遡上による影響は軽減されてゆく. 一方, 発災地点の右側については，排煙量の増加に伴い煙暴露者数は徐々に減少してゆくものの, F130_10Pa_q0.1_bus 及び F130_10Pa_q0.2_bus では出口坑口まで煙が拡がる傾向にある．排煙量を 0.3 m^3/s･m（F130_10Pa_q0.3_bus），0.4 m^3/s･m（F130_10Pa_q0.4_bus），0.5 m^3/s･m（F130_10Pa_q0.5_bus）では，前項と同様の理由により 350 m に位置するバスにまで煙は到達しない.

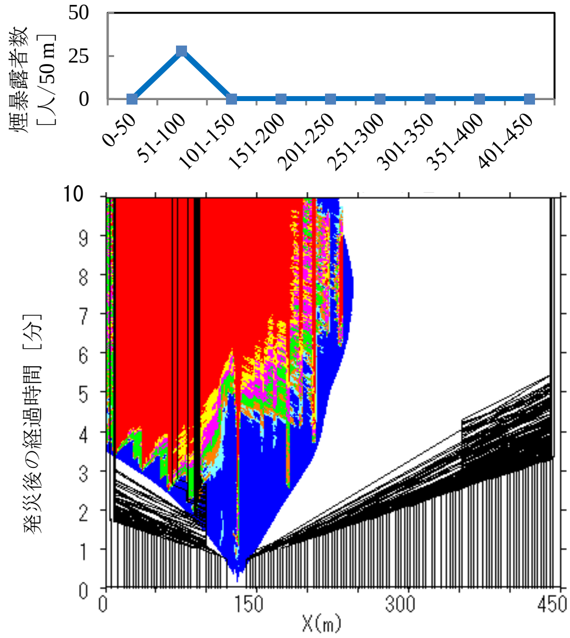


図 - 84　避難者行動マップ　F130_0Pa_bus

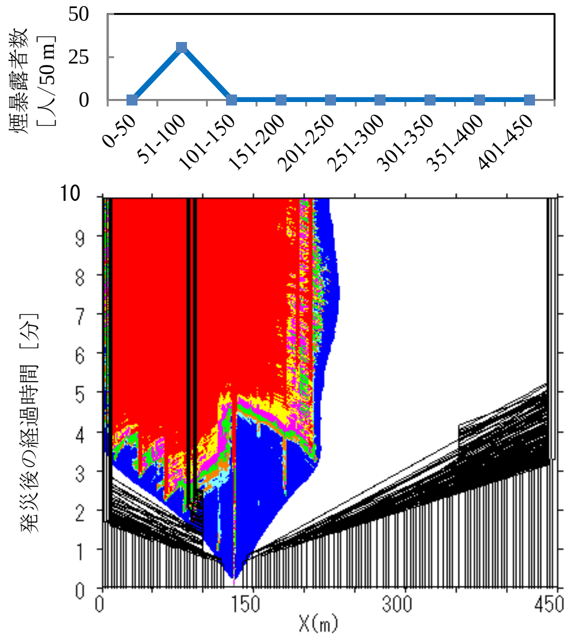
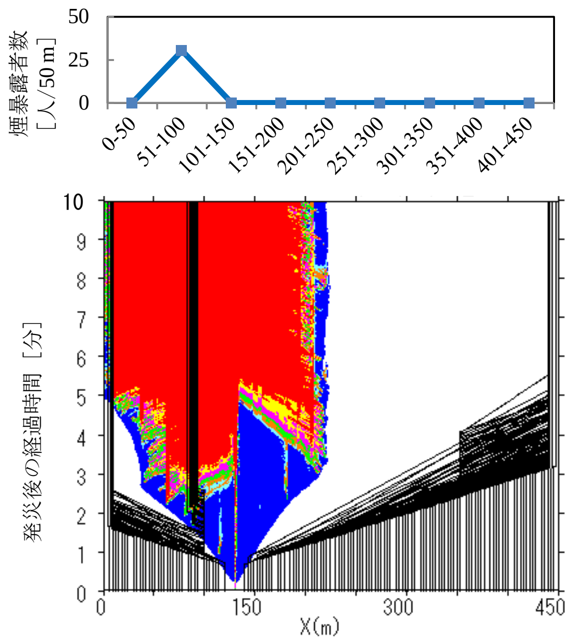
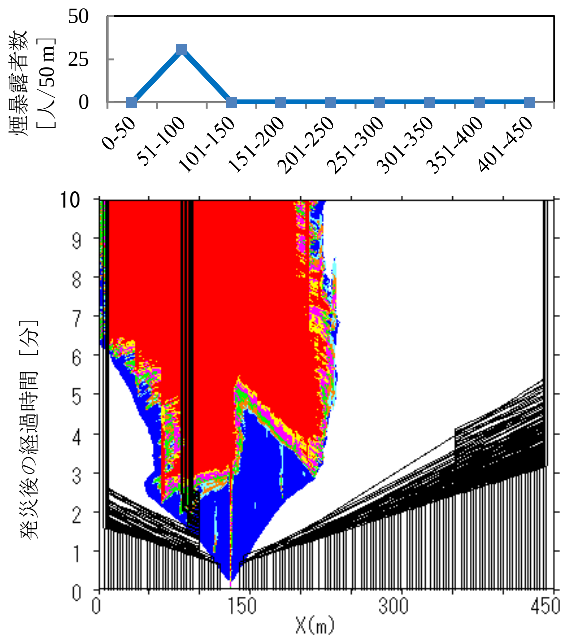


図 - 85　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.1_bus



図－86　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.2_bus



図－87　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.3_bus

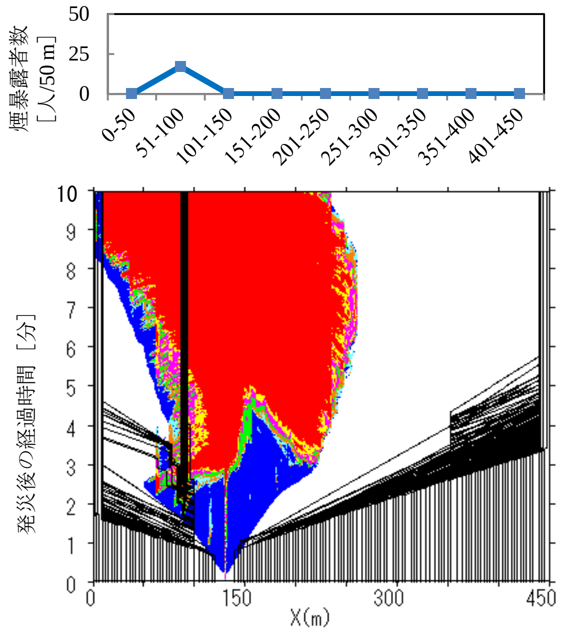


図 - 88　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.4_bus

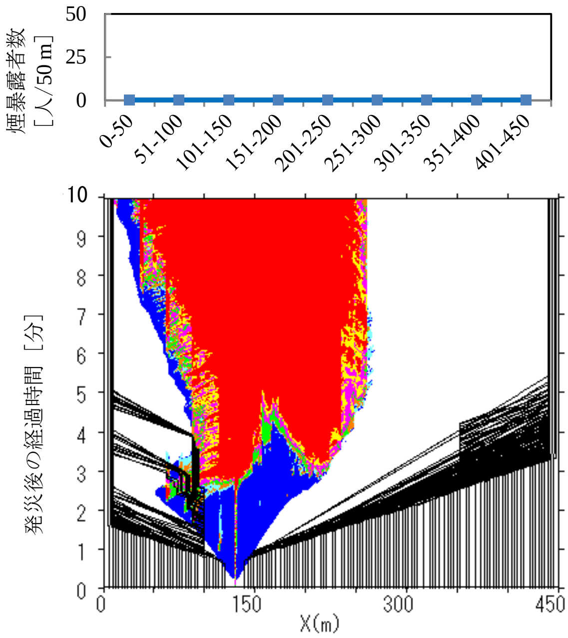


図 - 89　避難者行動マップ　F130_0Pa_q0.5_bus

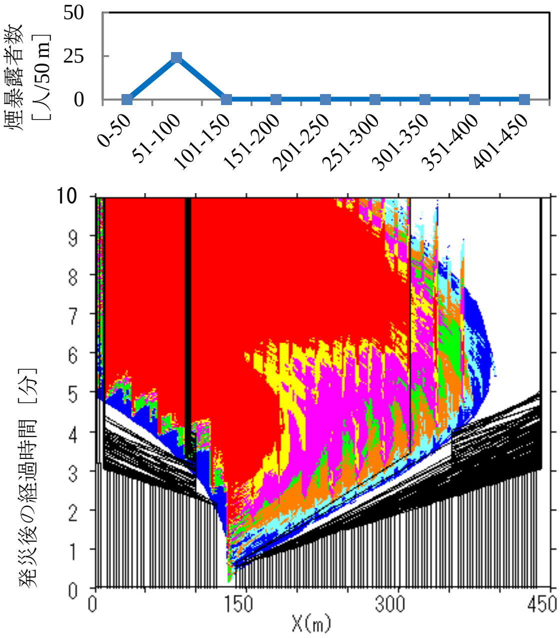


図 - 90　避難者行動マップ　F130_5Pa_bus

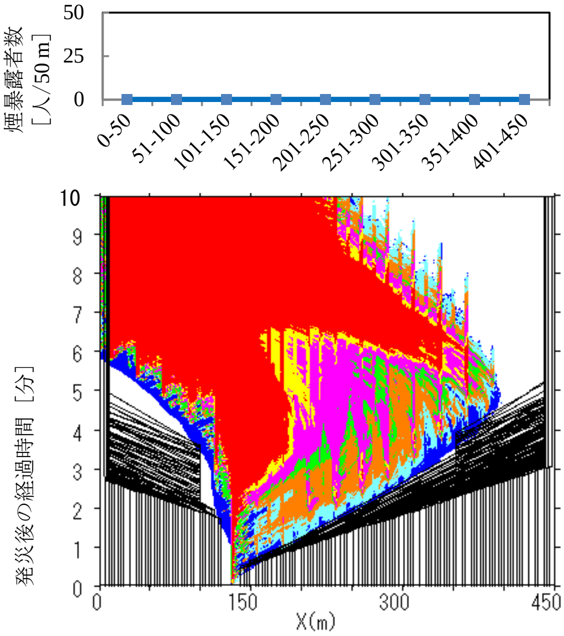


図 - 91　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.1_bus

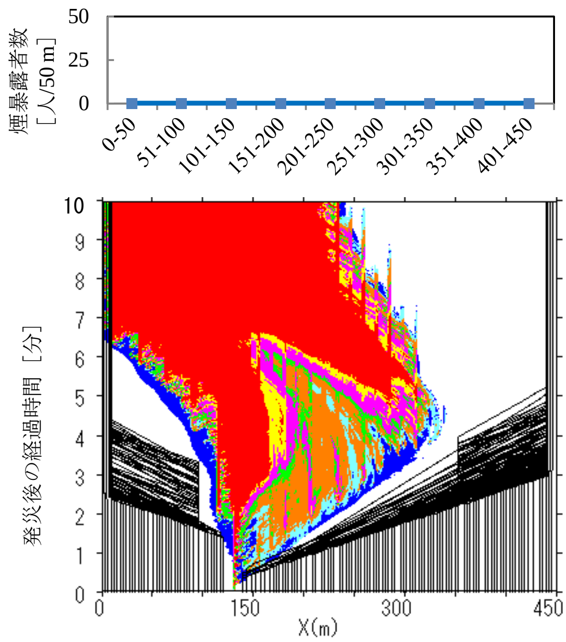


図 - 92　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.2_bus

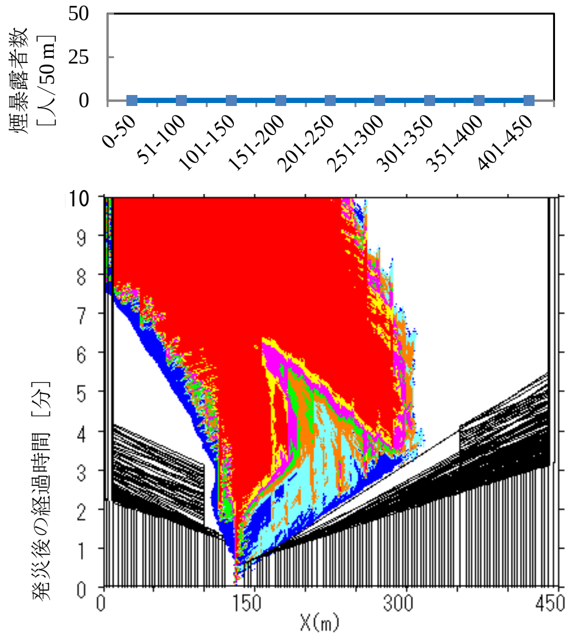
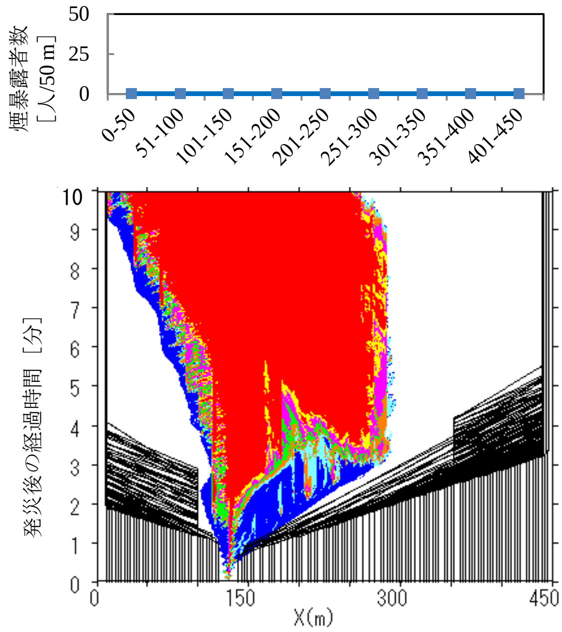
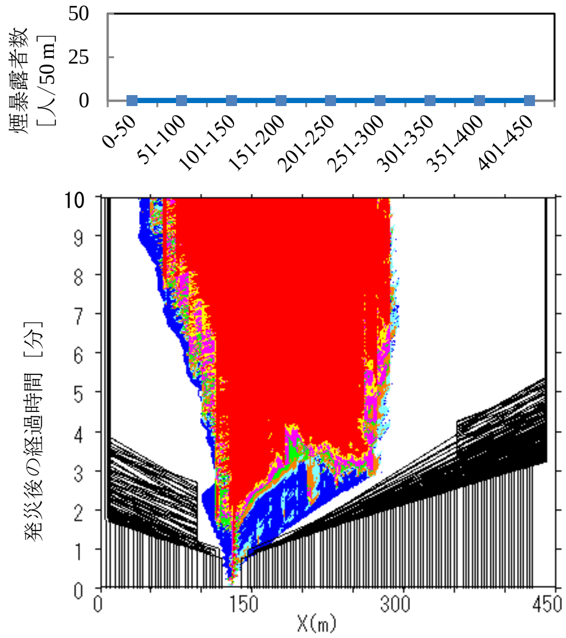


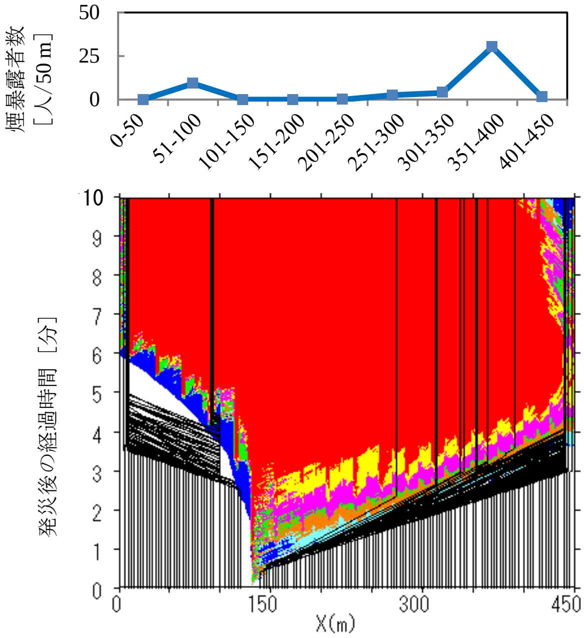
図 - 93　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.3_bus



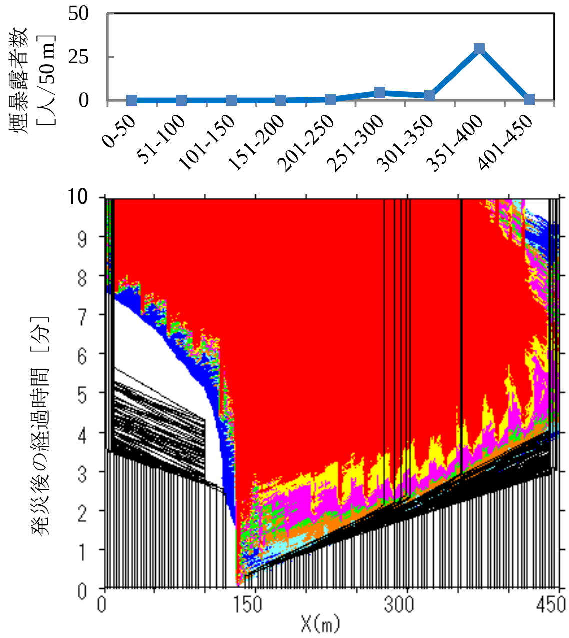
図－94　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.4_bus



図－95　避難者行動マップ　F130_5Pa_q0.5_bus



図－96　避難者行動マップ　F130_10Pa_bus



図－97　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.1_bus

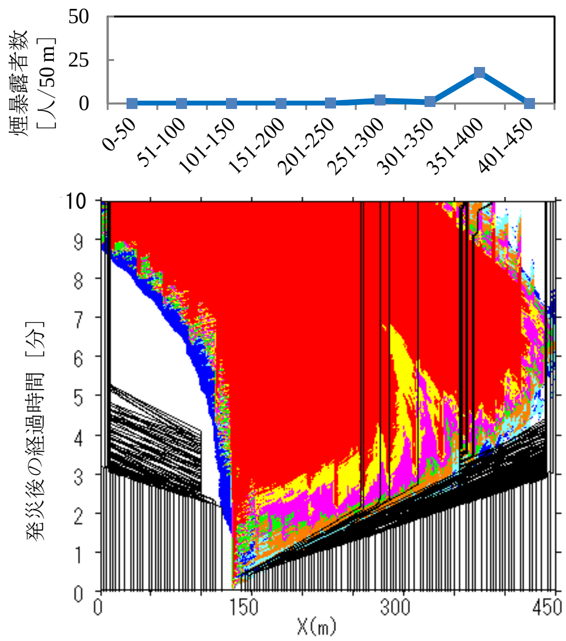


図 - 98　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.2_bus

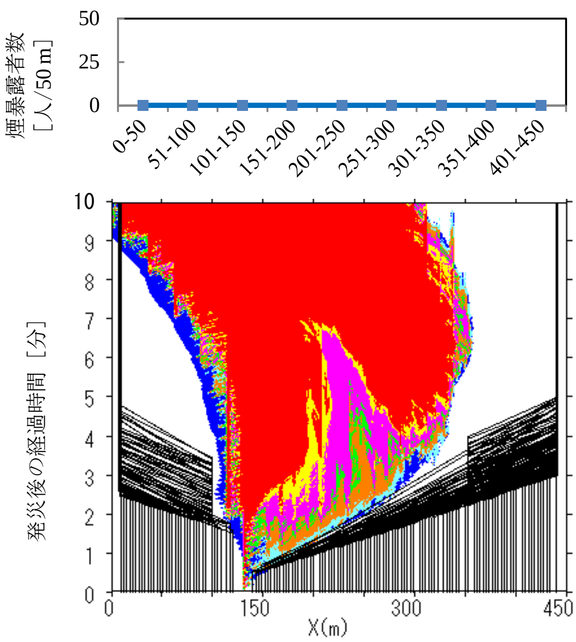
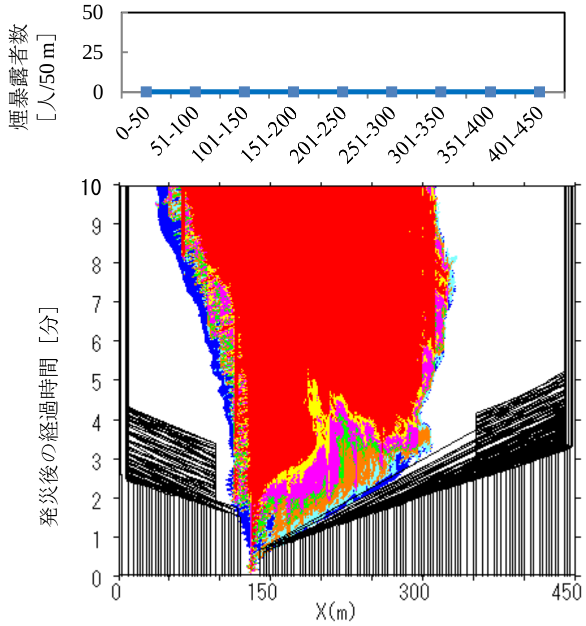
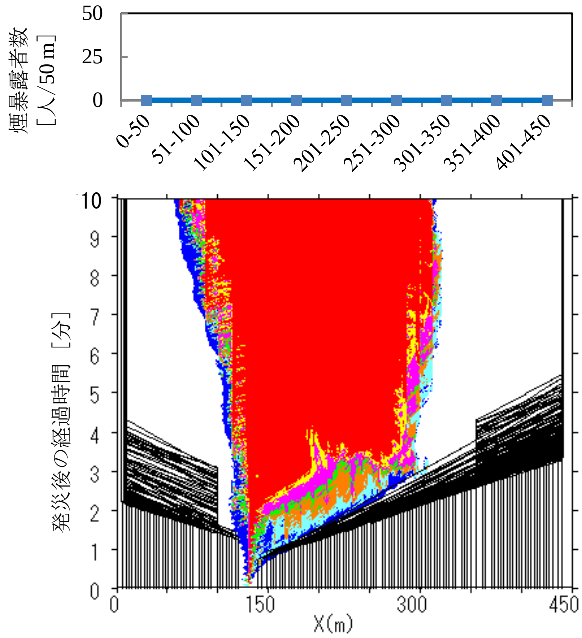


図 - 99　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.3_bus



図－100　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.4_bus



図－101　避難者行動マップ　F130_10Pa_q0.5_bus

表 - 11, 図 - 102に本ケースにおける平均煙暴露者数を示す. 坑口間圧力差が0 Paの場合, 入口区間における煙の遡上の影響で排煙を行わない場合から排煙量0.3 m^3/s･mまでで30人程度，0.4 m^3/s･mの場合でも20人程度の煙暴露者数が生じ，大きく減少するのは排煙量が0.5 m^3/s･mとなってからである．坑口間圧力差が5 Paでは，下り勾配による煙の遡上と自然風の影響による煙の拡がりが相殺され，0.1 m^3/s･m以上で煙に暴露される者はほとんど生じていない. 坑口間圧力差10 Paのケースでは, 排煙を行わない場合トンネルの全体に煙が拡がり, 火点から右側の区間を中心に50人に近い煙暴露者数が発生しているが，排煙量の増加に伴い減少傾向にあり，0.2 m^3/s･mと0.3 m^3/s･mの間で大きく減少することがわかる.

表 - 11　排煙施設を設置した場合の平均煙暴露者数（バス有，発災地点130 m）

坑口間圧力差 / 排気量	0 Pa（0 m/s）	5 Pa（0.85 m/s）	10 Pa（1.2 m/s）
0 m^3/s･m	27.661 （27.661 / 0）	24.022 （23.98 / 0.042）	47.454 （9.274 / 38.180）
0.1 m^3/s･m	30.429 （30.429 / 0）	0.059 （0.024 / 0.035）	37.694 （0.009 / 37.685）
0.2 m^3/s･m	30.352 （30.352 / 0）	0 （0 / 0）	20.390 （0 / 20.390）
0.3 m^3/s･m	30.420 （30.420 / 0）	0 （0 / 0）	0.045 （0 / 0.045）
0.4 m^3/s･m	17.084 （17.084 / 0）	0.0171 （0.0171 / 0）	0.036 （0 / 0.036）
0.5 m^3/s･m	0.030 （0.030 / 0）	0.015 （0 / 0.015）	0.068 （0 / 0.068）

※（発災地点上流側の人数/発災地点下流側の人数）

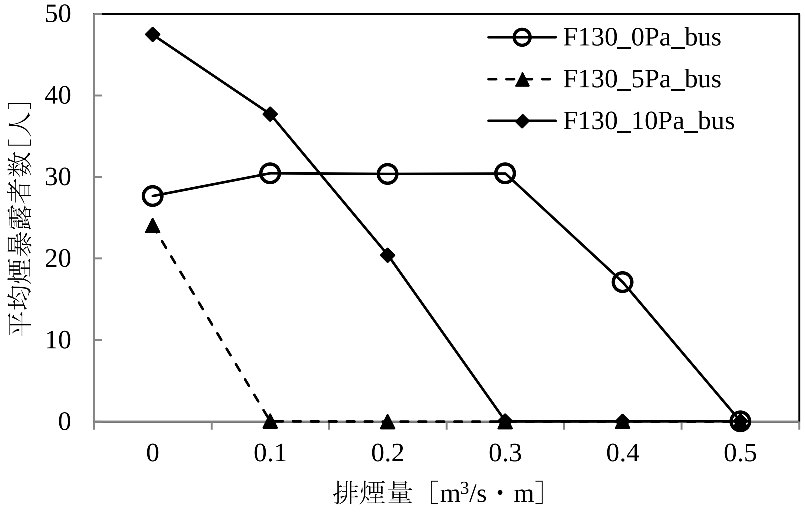


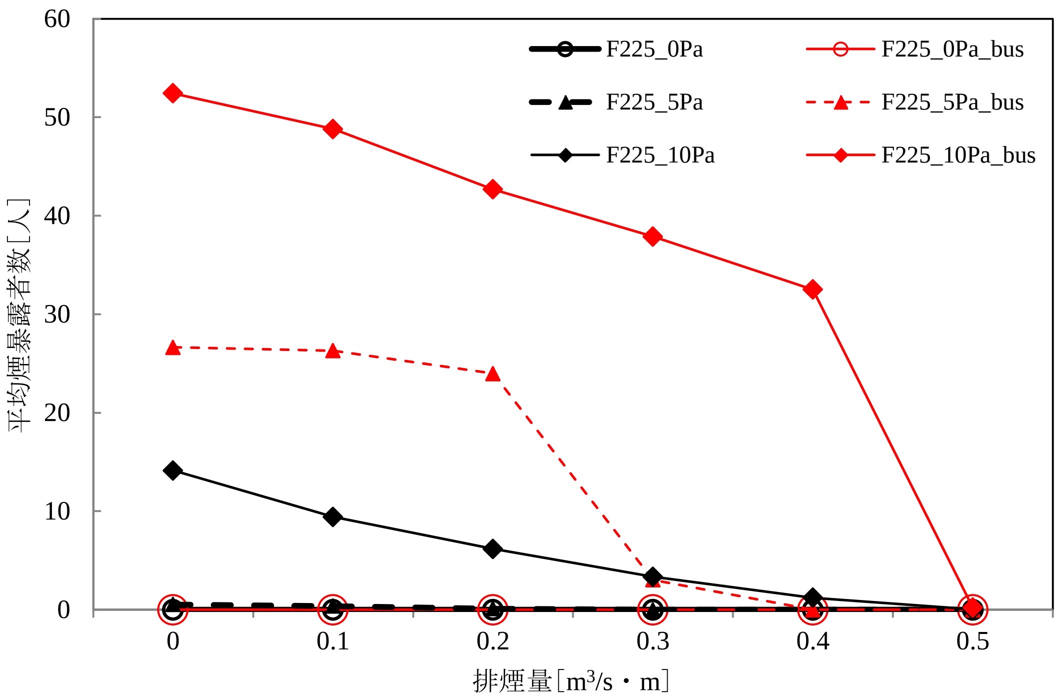
図 - 102　排煙時における平均煙暴露者数（発災地点130 m　バス有）

５．２．３　バスの有無による比較

このように，トンネル火災時におけるバスの有無は煙暴露者数に大きな影響を与える．

図‐103，表‐12 は発災地点が 225 m におけるバスの有無における煙暴露者数である．特に坑口間圧力差 10 Pa（1.2 m/s）が存在する場合，自然換気状態（排煙量 0 m^3/s･m）では 15 人程度の煙暴露者数が生じたが，0.3 m^3/s･m 以上の排煙を行うことで大幅に減少している．

一方，バスが存在する場合は 0.3 m^3/s･m の排煙を行っても 40 人程度の煙暴露者数が生じている．火災で発生した煙の拡がり方はバスの有無に係らずほぼ同様である．すなわち，トンネル内の任意の地点でトンネル利用者が煙に暴露される煙濃度（*Cs* 濃度 0.4 m^{-1}，路面からの煙の高さ 1.5 m）に達する時間に差異は無い．よって，乗車人数が多いバスでは避難の際に降車のための時間を要することから，降車前もしくは降車中に煙に暴露される者が多くなるものと考えられる．このように，トンネル内にバスが存在し，かつ自然風が存在する場合には 0.5 m^3/s･m 程度の排煙量を確保することが効果的である．



図‐103　バスの有無による平均煙暴露者数（発災地点225 m）

表 - 12　バスの有無による平均煙暴露者数（発災地点 225 m）

排煙量 ［$m^3/s \cdot m$］	0 Pa（0 m/s）		5 Pa（0.85 m/s）		10 Pa（1.2 m/s）	
	バス無	バス有	バス無	バス有	バス無	バス有
0	0	0	0.537	26.646	14.136	52.432
0.1	0	0	0.379	26.306	9.414	48.810
0.2	0	0	0.120	23.985	6.169	42.682
0.3	0	0	0.004	3.034	3.342	37.880
0.4	0	0	0.000	0.000	1.210	32.503
0.5	0	0	0.001	0.004	0.028	0.204

発災地点が 130 m の場合（図 - 104，表 - 13）に示す．このケースでは発災地点がトンネルの入口側であることから，バスが存在する場合，下り勾配による煙の遡上が要因で多くの煙暴露者数が増加するケースと自然風（坑口間圧力差 10 Pa の場合）の存在による増加するケースに分かれる. 特に, 煙の遡上による影響は大きく自然風が小さい場合（F130_0Pa_bus）は，排煙量を 0.5 $m^3/s \cdot m$ とするまでは排煙の効果が見られない結果となった.

以上より，利用者数の多いバスがトンネル内に存在する場合，煙暴露者数は大幅に増加するが 0.5 $m^3/s \cdot m$ 以上の排煙は利用者の安全な避難行動を確保するために有効であることがわかる.

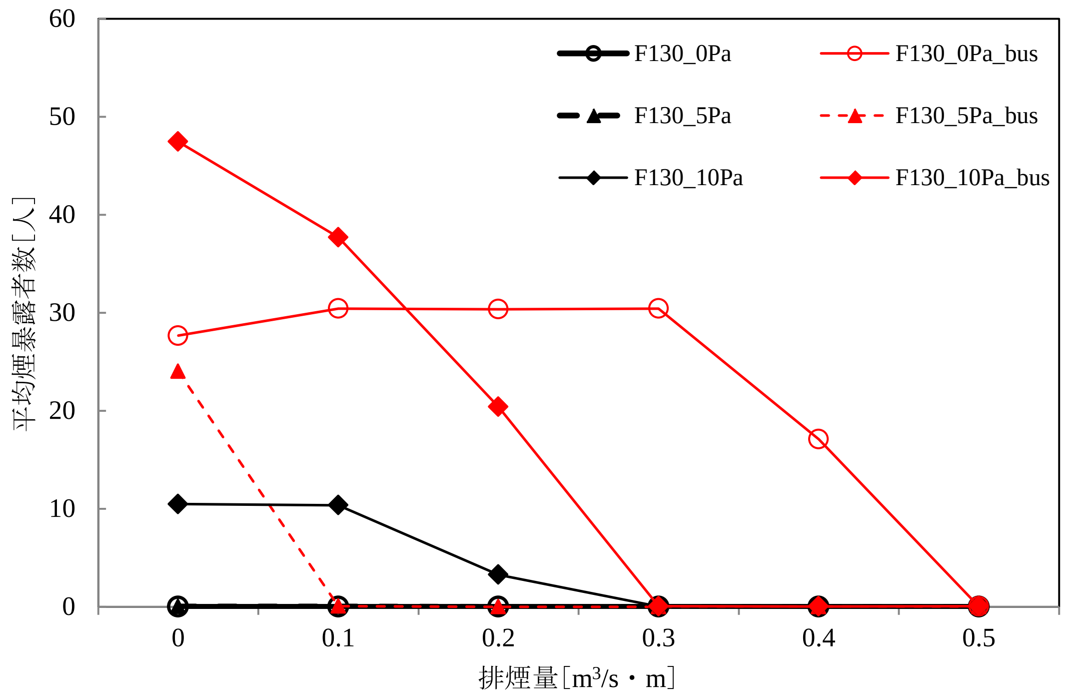


図 - 104　バスの有無による平均煙暴露者数（発災地点130 m）

表 - 13　バスの有無による平均煙暴露者数（発災地点 130 m）

排煙量	0 Pa（0 m/s）		5 Pa（0.85 m/s）		10 Pa（1.2 m/s）	
［m^3/s･m］	バス無	バス有	バス無	バス有	バス無	バス有
0	0	27.661	0.032	24.022	10.480	47.454
0.1	0	30.430	0.030	0.059	10.366	37.694
0.2	0	30.352	0.000	0.000	3.277	20.390
0.3	0	30.420	0.000	0.000	0.021	0.045
0.4	0	17.084	0.000	0.017	0.036	0.036
0.5	0	0.030	0.009	0.015	0.069	0.068

以下に本章の結果をまとめる.

トンネル内にバスが存在する場合,

・バスは乗車人数が多く避難に時間を要することから，排煙を行っていても利用者の避難環境が悪化する場合がある.

・トンネル内にバスが存在する場合でも，排煙量を0.5 m^3/s･m以上とすると，避難環境を維持することが出来，効果的である.

ゆえに，バスが存在する場合においても一定規模の排煙はトンネル内の安全性を確保するために有効である.

６．結論

都市部の道路トンネルは交通量が多いことから，これまで延長が 500 m 程度の短いトンネルも含めトンネル内の環境を維持する目的で換気施設の設置と運用が進められてきた．

しかし，近年の排出ガス規制によりその役割は終焉を迎え同施設の必要性は小さくなってきている．一方，道路トンネルにおける火災事故は閉鎖空間であることから利用者の安全や構造物に重大な影響を与える可能性を有しており，毎年一定の水準で発生している．

火災時の安全性を確保するために換気施設を用いた排煙は最も有効な手法の一つであるが，道路トンネルにおいて換気施設の規模を定める指標はトンネル内の環境の維持によるもののみであり，火災時の排煙を念頭においた換気施設に関する設計基準や要領は存在しておらず，基礎的な研究や検討もほとんど行われていない．

このような状況のもと，本研究では道路トンネルの火災時における排煙，すなわち換気施設の有効性に主眼を置き，換気施設の有無による影響や火災時のさまざまな条件の相違による同施設の有効性について検証を行った．また，安全性を確保するうえで必要であると思われる換気施設の規模についても提案を行ったものである．

以下に各章での結論をまとめる．

1 章では，道路トンネルにおける換気及び排煙の方法や火災時の換気施設の運用について，また，国外における欧州を中心とした火災時の排煙に関する考え方，さらに，国内における換気施設をとりまく背景と本研究の目的について記述した．

以下に本研究の背景と目的をまとめる．

・道路トンネルの換気施設はトンネル内の排出ガスの除去に加え，人命を左右する火災時の排煙という重要な機能も有している．

・換気施設はトンネル内の排出ガスの除去に必要な規模で定められており，排煙に必要な規模はこれらの範囲内とされている．

・近年の自動車排出ガス規制の強化によりトンネル内の排出ガスの除去という目的は年々失われつつある．このため，現状では延長の短い道路トンネル含め，既に設置されている換気施設は縮小や撤去という方向に進むことになる．

・一方，道路トンネルにおける火災は恒常的に発生しており，排煙を目的とした換気施設は必要であると考えられるが，その有効性や規模を定める手法が確立されていない．

上記より，本研究の目的を以下のとおりとした．

・換気施設による排煙の有効性を検討する．

・火災時の安全性を確保するために必要な排煙の規模（換気施設の規模）を検討する．

2 章では，1 章で掲げた課題を検討するための方法と条件を記述した．

本研究で採用したシミュレーションモデルは以下のとおりである．

・煙の挙動解析については三次元シミュレーション Fireles 活用した．

・利用者の避難状況の把握については一次元避難シミュレーションを用いた．

・双方とも道路トンネルにおける火災時の検証に最も採用されているモデルである．

なお，検討における諸条件は以下のとおりである．

・延長 450 m の船底型道路トンネル，2 車線一方通行，断面形状は矩形．

・交通条件はトンネル内全域を渋滞，大型車混入率 10%，バスの有無を条件に加えた．

・煙の挙動に影響を与える坑口間圧力差を 3 ケース（0 Pa，5 Pa，10 Pa）とした．

・発災車両は大型車 1 台（有効成分 30 MW）とした．

・発災地点は，入口坑口から 225 m（中央部），130 m（下り勾配部）の 2 ケースとした．

・解析時間はトンネル利用者の避難行動が可能な時間として 10 分間とした．

・利用者の避難時における平均歩行速度を 1.5 m/s とした．

・利用者が煙濃度（*Cs* 濃度）0.4 m^{-1} かつ路面から 1.5 m にて煙に暴露された場合を避難が困難であると定義し，各ケースにおける煙暴露者数を算出した．

3 章では，延長 450 m の船底型トンネルをモデルとして排煙をしない自然換気状態における安全性について発災地点を入口から 225 m 及び 130 m の 2 地点，トンネル両坑口間の圧力差を 0 Pa（0 m/s），5 Pa（0.85 m/s），10 Pa（1.2 m/s）3 ケース設定しトンネル利用者が火災で発生した煙に暴露される数（平均煙暴露者数）を検討した．

以下に本章の結果をまとめる．

排煙をしない自然換気状態のトンネルにおいて，

・坑口間圧力差が 5 Pa（0.85 m/s）以下の自然風であれば，利用者の避難環境は確保出来る．

・坑口間圧力差が 10 Pa（1.2 m/s）以上の自然風の場合，利用者の避難環境は極端に悪化する．

ゆえに，排煙が出来ない自然換気状態のトンネルで火災が発生した場合，低風速ではあるが1.2 m/s程度の自然風が存在すると利用者の安全性に重大な影響を与える．

4 章では，換気施設による排煙を行った場合の煙暴露者数の発生の状況について検討を行った．設定した排煙量は，0.1 m^3/s･m，0.2 m^3/s･m，0.3 m^3/s･m，0.4 m^3/s･m，0.5 m^3/s･m である．以下に本章の結果をまとめる．

換気施設による排煙を行う場合，発災地点が225 m，130 m地点いずれの場合においても，

・排煙量0.1 m^3/s･mでは，排煙の効果はほとんど見られなかった．

・トンネル内に自然風が存在する場合でも，排煙量が0.3 m^3/s･m以上の排煙量とすると，避難環境を維持することが出来，効果的である．

ゆえに，自然風を有する場合においても一定規模の排煙はトンネル内の安全性を確保するために有効である．

5 章では，前章の条件に加えトンネル内の利用者が多いバスが存在するケースを検討した．本ケースではバスが存在しない前章のケースとは大きく傾向が異なる結果となった．

以下に本章の結果をまとめる．

トンネル内にバスが存在する場合，

- バスは乗車人数が多く避難に時間を要することから，排煙を行っていても利用者の避難環境が悪化する場合がある．
- トンネル内にバスが存在する場合でも，排煙量を0.5 m^3/s･m以上の排煙量とすると，避難環境を維持することが出来，効果的である．

ゆえに，バスが存在する場合においても一定規模の排煙はトンネル内の安全性を確保するために有効である．

以上より，延長の短い道路トンネルにおいて火災が発生した場合，本研究の結論をまとめると，

- 延長が短い道路トンネルでも，排煙をしない自然換気状態のトンネルでは，1.2 m/s 以上の自然風を有する場合，利用者の避難環境は極端に悪化する．この 1.2 m/s 以上の自然風は通常トンネル内で発生する可能性がある自然風である．
- 換気施設による排煙は有効であり，0.3 m^3/s･m 以上の排煙量とするとトンネル内に自然風が存在する場合でも，避難環境を維持することが出来，効果的である．
- さらに，利用者の多いバスがトンネル内に存在する場合，0.5 m^3/s･m 以上の排煙量を確保することで，利用者の避難環境を確保することが可能である．

本研究の結果より，道路トンネルにて火災が発生した場合，延長が短い場合でも自然風の影響により煙が拡散し利用者の避難環境に影響を与えることが判明した．一方，換気施設を用いて一定の規模以上の排煙を行うことにより，利用者が避難する際の安全を確保することが可能であることが明らかとなった．火災時において利用者の安全性を確保するための防災施設は本研究の対象とした換気施設の他，消火設備や誘導設備など多くの種類が存在していることから，これらを包含した複合的な安全性の確保を目的とした諸施設の在り方についてさらなる研究を継続して行く必要があると考える．

参考文献

1) 首都高速道路株式会社：機械設備設計要領［トンネル換気設備編］，2014.7.

2) Alan Beard and Richard Carvel：Handbook of Tunnel Fire Safety Second edition, 2011.

3) US. Department of Transportation：Underground Transportation Systems in Europe, Safety, Operations, and Emergency Response, pp.23, 2006.

4) Anton Waltl：Safety measures for road tunnels – Newest development for the Plabutsch tunnel, Austria, 2th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, pp. 163-170, 2004.

5) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説，2001.10.

6) 社団法人日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説，2001.10.

7) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第三集 トンネル編 トンネル換気, 2014.7.

8) 首都高速道路株式会社：トンネル非常用施設設計要領，2014.7.

9) 国土交通省：道路統計年報2013，トンネルの現況 表75トンネル延長階級区分別都道府県別トンネルの現況《合計》
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2013/pdf/t_genkyou75.pdf.

10) 総務省消防庁：消防白書平成24年版　第II部　消防行政を取り巻く現状と課題について　第1章　災害の現況と課題　第9節　その他の災害対策［地下施設等の災害対策］2.地下施設等の災害対策の現況　(2)道路トンネル
http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h24/h24/html/2-1-9c-2_2.html.

11) 大気汚染防止法，1968.6.

12) 大気汚染防止法施行令の一部を改正する政令等の施行について，1969.4.

13) 自動車排出ガスの量の許容限度　環境庁告示，1974.1.

14) 中央公害対策審議会大気部会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について，1985.11.

15) 中央公害対策審議会大気部会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第三次答申）　別紙2ディーゼル自動車の許容限度設定目標値（平均値），1988.12.

16) 中央公害対策審議会大気部会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第五次答申），2002.4.

17) 中央公害対策審議会大気部会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第八次答申），2005.4.

18) 東京都環境局：都民の健康と安全を確保する環境に関する条例及び施行規則，2000.12.

19) 国土交通省：記者発表資料，自動車排出ガス規制の強化（ポスト新長期規制）について～新車のディーゼル車等に対し平成21年10月から順次強制適用～，参考資料2　自動車

排出ガス規制の経緯　（ディーゼル重量車）2008.3.25.
20) 総務省消防庁：消防白書平成24年版 第II部 消防行政を取り巻く現状と課題について 第1章 災害の現況と課題 第9節 その他の災害対策［地下施設等の災害対策］1.地下施設等の災害の現況と最近の動向
http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h24/h24/html/2-1-9c-1.html.
21) Beettelini, M. and Rigert, S. : Ventilation and escape facilities for short cut-and-cover urban tunnels, *7th International Conference Tunnel Safety and Ventilation—New Development in Tunnel Safety—*, pp. 213-220, 2014.
22) 川端信義，王謙，八木弘：第二東名･名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討，空気調和･衛生工学会論文集　(74)，pp.101-111，1999.
23) 國兼裕子，川端信義，竹國一也，下田哲史：大断面トンネルにおけるガソリン火皿火災時の発熱速度の検討，日本機械学会論文集（B編），Vol. 69, No. 685, pp. 2044-2051, 2003.
24) 菊本智樹，川端信義，丸山大輔，山田眞久：乗用車専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（数値シミュレーションによる検討），土木学会論文集F, Vol. 63, No. 4, pp. 448-459, 2007.
25) 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, 土木学会論文集F2（地下空間研究）, Vol. 70, pp.1-12, 2014.
26) 坂本明：首都高速道路千代田トンネル（千鳥ヶ淵）換気設備，日立論評第47巻第2号，P47-55，昭和40年2月.
27) 首都高速道路株式会社：第28回首都高速道路交通起終点調査報告書平成24年11月調査 図2-29車種別利用交通構成図，P91，2014.
28) 国土交通省：第1回道路事業評価手法検討委員会：平成１１年価格と平成１５年価格との詳細比較表
29) 森本 智，石村 利明，角湯 克典 ， 三谷敦史：自然風･交通換気力を活用したトンネルの新換気制御方式に関する検討，地下空間シンポジウム論文･報告集 第17巻　土木学会, p 217-222，2012.
30) Ingason, H and Lönnermark, A : Chapter 14 Heat release rates in tunnel fires : a summary, Handbook of Tunnel Fire Safety, 2nd edition, pp. 317
31) Dobashi, M., Imai, T., Yanagi, H., Mizuno, A. : Numerical simulation of the emergency tunnel ventilation for a tunnel with longitudinal and transverse systems combined, 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group, Vol. 43, pp. 581-595, 2000.
32) 首都高速道路株式会社：施設管制システムパンフレット,2000.6.
33) 首都高速道路株式会社：中央環状線 山手トンネル（湾岸線～渋谷線）パンフレット. 2015.3.

付録

（付録 1）三次元シミュレーション Fireles[22]における特徴及び基礎式について

煙挙動解析にて用いた三次元シミュレーション Fireles[22]の特徴は下表のとおりである．

付録表 - 1　三次元シミュレーション Fireles[22]の特徴

乱流モデル	速度場	LES（Smagorinsky モデル）
	温度場	0 方程式モデル
	煙濃度場	0 方程式モデル
火源モデル		発熱領域
壁への吸熱モデル		1 次元熱伝導方程式と連立
壁の摩擦抵抗		壁関数/対数則（粗い壁）
圧縮性		低マッハ数近似
移流項スキーム	速度場	4 次精度中心差分（又は 2 次）
	温度場	3 次精度風上差分（又は CIP 法）
	煙濃度場	1 次精度風上差分（又は CIP 法）

基礎式は以下に示す流体の圧縮性を考慮した支配方程式を用いている．

連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0$$

運動方程式

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \tau + (\rho - \rho_0)\mathrm{g}$$

ただし，

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla),\quad \tau = \rho \nu_t[(\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T)]$$

であり，P［Pa］を絶対圧力，P_s［Pa］，ρ_0［kg/m^3］を非発災時でかつ $\mathbf{v} = 0$とした時の圧力，密度とし，$p = P - P_s$ とする．

エネルギー方程式

$$\rho\frac{DC_v\Delta T}{D_t}=\nabla\left(\frac{C_v\rho v_t}{\sigma_h}\nabla\Delta T\right)+Q_h-P(\nabla\cdot\mathbf{v})$$

状態方程式

$$\rho=\frac{P}{R(\Delta T+T_0)}$$

煙の拡散方程式

$$\rho\frac{DM}{D_t}=\nabla\left(\frac{\rho v_t}{\sigma_C}\nabla M\right)+\rho S_c$$

ここで，ρ_0［kg/m³］は密度，$\mathbf{v}$［m/s］は速度ベクトル，T_0［K］は通常時の雰囲気温度，g［m/s²］は重力加速度（$-z$方向にのみ作用），C_v［J/（kg･K)］は定容比熱，σ_h は乱流プラントル数，σ_Cは乱流シュミット数，M［g/m³］は煙質量濃度，Q_h［W/m³］は単位体積あたりの煙発生速度，v_t［g/（s･m³)］は乱流拡散係数である．

（付録 2）トンネル利用者の避難に関する指標について

本論文では，火災時におけるトンネル利用者の避難行動の指標として，参考文献「25)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, 土木学会論文集 F2（地下空間研究）, Vol. 70, pp.1-12， 2014.」に基づき, 煙が避難者に及ぼす影響の度合いについて危険度 R を用いて評価を行っている．

2 章の「方法及び条件」及び 3 章の「排煙をしない自然換気状態における安全性」では，トンネル利用者の避難が困難となる指標として，煙濃度（*Cs* 濃度 0.4 m^{-1}）と路面からの高さ（1.5 m）のみを記載しているが，参考論文では危険度 *R* について煙濃度と煙高さについてより詳細な段階で定義されていることからこの概要について補足する．

参考論文では，煙濃度と煙高さの関係から危険度が設定されており，各段階に応じた煙濃度について色分けがなされている．参考論文における危険度の定義を付録表-2 に示す．

なお，本表は参考論文の 4 ページ「表-1　本論文での危険度の定義」に基づき記載している．表中において，トンネル利用者の避難行動が困難となる煙濃度（*Cs* 濃度 0.4 m^{-1}）かつ路面からの高さ（1.5 m）は，危険度 3 と危険度 4 の間に位置し，煙濃度の色分けでは橙色と緑色の境が該当することになる．

付録表 - 2　参考論文における危険度の定義

危険度 *R*	色	煙濃度 *Cs*［m^{-1}］	煙高さ *z*［m］
0			
		0.4	4.0
1			
		0.1	1.5
2			
		0.2	1.5
3			
		0.4	1.5
4			
		0.4	1.0
5			
		0.8	1.0
6			
		1.2	1.0
7			

本論文に関する学術論文と講演発表一覧

１．学術論文

三瓶　靖弘，川端　信義，清家　美帆
延長の短い都市内道路トンネルにおける火災発生時の排煙の有効性について
土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol. 71，No. 1，pp. 11-19，2015 年 6 月.

２．国内講演発表

日本火災学会
三瓶　靖弘，川端　信義，清家　美帆
排煙設備の無い道路トンネルにおける火災時の安全性に関する検討
平成 25 年度　日本火災学会研究発表会概要集 2013　pp. 10-11

３．海外講演発表

Yasuhiro. Mikame, Nobuyoshi Kawabata, Miho. Seike, Masato Hasegawa
STUDY FOR SAFETY AT A RELATIVELY SHORT TUNNEL WHEN A TUNNEL FIRE OCCURRED
7th International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety -, pp. 133-139, Graz, Austria, May 2014.

Yasuhiro. Mikame, Nobuyoshi Kawabata, Miho. Seike
Evaluation of safety during a tunnel fire in a short road tunnel
The 6th Taiwan/Japan/Korea Joint Seminar for Tunnel Fire Safety and Management, pp.235-242, Kaohsing, Taiwan, October 2014.

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心にそして幅広い視点から丁寧にご指導いただいた金沢大学大学院自然科学研究科川端信義教授に心より御礼申し上げます.

お蔭をもちまして，川端信義教授を初め多くの方々からのご支援により本論文をとりまとめることが出来ました.

川端信義教授に初めてご指導をいただいたのは，2000 年（平成 12 年）頃よりスタートした首都高速道路中央環状線の都市内長大トンネル新設に伴う火災時の安全性に関する検討プロジェクトでした. その後，筆者は営業中路線の施設を管理する部署に在籍しましたが，そこでは開業年次の古い延長の短い道路トンネルの火災時における設計手法が課題となっており，どのような方向で進むべきか考えあぐねいておりました.

このような時に川端信義教授と再会を果たし，ご相談にのっていただいたことが本研究を始めるきっかけとなりました．そして，本論文の完成により筆者の長年の疑問に対する答えを導くことが出来たことに対し重ねて御礼申し上げます.

本研究にあたり金沢大学理工研究域の清家美帆博士におきましては様々な面できめ細かなご指導をいただき誠にありがとうございました．また，中日本ハイウエェイ・エンジニアリング株式会社施設技術部次長の横田博士におきましては，社会人大学院生の先輩として仕事と研究の両立について数多くのアドバイスをいただき本当にありがたく思う次第です．さらに，研究を進めるなかで多大な助言をいただいた日本消防検定協会の栗岡博士，株式会社エコープラン顧問の山田眞久博士，菊本智樹博士，パシフィックコンサルタンツ株式会社の江本氏に深く感謝致します.

社会人の学生として 2012 年（平成 25 年）に送りだしていただいた，首都高速道路株式会社技術部長小笠原政文様（現首都高技術株式会社代表取締役社長）をはじめ，技術担当部長田島清様，施設技術課課長三具正孝様，首都高速道路株式会社並びに首都高技術株式会社の皆様には大変お世話になりました．ありがとうございました.

また，　本学位論文の審査にあたっていただきました，理工学域機械工学類教授の木村繁男様，理工学域機械工学類教授の木綿隆弘様，理工学域機械工学類教授の児玉昭雄様，理工学域機械工学類准教授の多田幸生様に感謝致します.

最後に，3 年間に渡り応援してくれた家族に謝意を表します.

2015 年 9 月

三瓶　靖弘