日本の道路トンネルの換気方式の変遷と今後の課題

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山田, 眞久, Yamada, Masahisa メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42349

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

博　士　論　文

日本の道路トンネルの換気方式の変遷と今後の課題

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　　1223122009

氏　　名　　山　田　眞　久

主任指導教員名　　川　端　信　義　教授

目　　次

１　序論 ･･ 1
１－１　日本の道路トンネルの換気方式の概要 ･･････････････････････････････････ 1
１－１－１これまでに供用された機械換気を有するトンネル ･･････････････････････ 1
１－１－２　道路トンネルの換気方式 ･･････････････････････････････････････ 3
２　換気方式と対象路線 ･･ 10
３　換気方式の変遷とその背景 ･･ 12
３－１　最初の導入 ･･ 12
３－２　都市間高速道路トンネル ･･ 13
３－３　都市内高速道路トンネル ･･ 15
３－４　一般道路トンネル ･･ 16
３－５　換気方式の採用とその背景 ･･ 16
４　換気方式に大きな影響を与えた要因 ･･････････････････････････････････････ 18
４－１　換気対象物質と設計濃度及び排出量 ････････････････････････････････ 18
４－２　長大トンネルの縦流換気方式 ･･････････････････････････････････････ 33
４－３　ジェットファンの技術的進歩 ･･････････････････････････････････････ 36
５　今後の道路トンネルの換気方式 ･･ 40
５－１　換気計画を行う際の課題 ･･ 42
５－２　換気計画上の対応方法 ･･ 44
５－２－１　ジェットファンの採用 ･･ 44
５－２－２　坑口集中排気方式の排風量及びジェットファン設備 ･･････････････ 49
５－２－３　風速零化設備の減少方法 ･･････････････････････････････････････ 51
６　排煙設備と避難施設 ･･ 58
６－１　排煙設備と火災時の対応 ･･ 58
６－２　一方通行縦流換気方式の火災時の課題の抽出 ････････････････････････ 72
６－２－１　車道内風速及び車道内圧 ･･････････････････････････････････････ 87
６－２－２　シミュレーション結果 ･･････････････････････････････････････ 80
６－２－３　課題の抽出 ･･ 89
６－３　対応方法と試算 ･･ 103
６－３－１　対象延長 ･･ 103
６－３－２　交通関連 ･･ 103
６－３－３　反対車線の換気機の運用 ･･････････････････････････････････････ 109
６－３－４　換気制御関連 ･･ 116
６－３－５　避難扉関連 ･･ 120
６－３－６　その他の課題と対応方法 ･･････････････････････････････････････ 122
７　結論 ･･ 132
７－１　日本の道路トンネルの換気方式 ･･････････････････････････････････････ 132
７－２　換気設備と避難施設と縦流化に伴う課題 ･･････････････････････････････ 134
７－３　車道内圧、避難扉解放、零化設備規模への対応策 ･･････････････････････ 135

１　序論

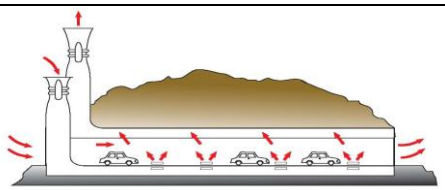
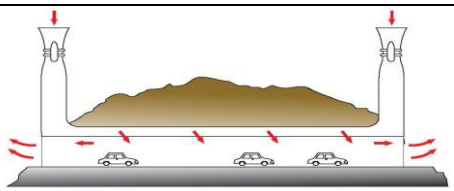
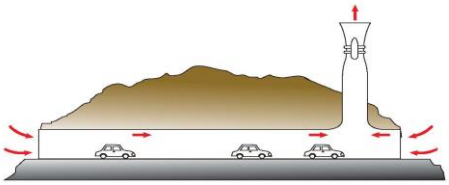
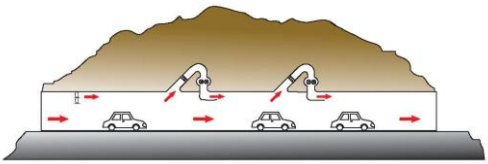
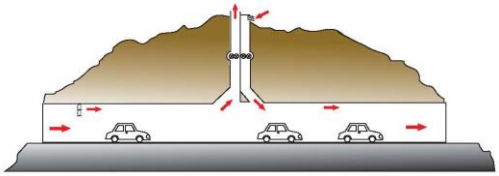
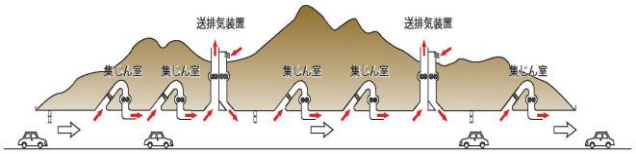
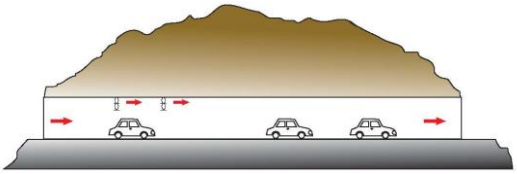
日本の道路トンネルに初めて換気設備が設置されたのは 1958 年の関門トンネルである。国土の約 70％が山岳地帯であるため､道路ネットワークの整備に伴って､数多くのトンネルが建設され、現在では世界有数のトンネル保有国となった。トンネル換気設備は、走行安全性、維持管理作業環境の確保や火災時の熱気流（煙）をコントロールする役割を果たす。数多くのトンネルへの対応(経済性の追求)による換気技術の進歩、環境保全意識の高まりによる自動車排出ガスの規制強化、トンネル坑口周囲の環境への影響低減が求められてきた。ここでは、これらの影響を受けた日本の道路トンネルの換気方式の 55 年間の変遷をまとめ、今後の換気方式の方向と課題を抽出すると共にその対応方法について研究を行ったものである。

１－１　日本の道路トンネルの換気方式の概要

１－１－１これまでに供用された機械換気を有するトンネル

日本の道路トンネルは、9,000 本を超える。この中で、換気設備を有するトンネルは約 1100 本（後に換気機が撤去されたトンネルを含む）に達する。表１に示す様に基本的な換気方式は、横流式、送気半横流式及び縦流式となるが縦流式は数が多く５種類があり全体では７種類程度となる。その内訳は 95％が縦流式であり、そのうちの 85％以上がジェットファン縦流式である。

表　1　換気方式とトンネル本数（2012 年現在：後に換気機が撤去されたトンネルを含む）

換気方式		本数	換気概要図
横流式		15	
送気半横流式		55	
縦流式	集中排気式	96	
	電気集塵式	28	
	送排気式	9	
	電気集塵機付送排気式	11	
	ジェットファン式	926	
合計		1140	

１－１－２　道路トンネルの換気方式

道路トンネルの換気方式は、走行する車両から排出される排気ガスを設計濃度まで希釈するために新鮮空気を供給または排出して入れ替える方法で有り、その方法により横流式、半横流式、縦流式に分けられる。

最近では、電気自動車や燃料電池自動車が話題となっているがまだ化石燃料を利用する車両が大半を占める。日本の場合、税金の関係からほぼ大型車は軽油、小型車はガソリンを使用している。車両から排出される排気ガスは、煤煙、一酸化炭素（以下 CO と称す)、窒素酸化物等数多くあるが排出量と設計濃度との関係で視認性を阻害する代表として煤煙を、生理的影響を与える代表として CO を換気対象物質として採用してきている。煤煙の設計濃度は、快適性及び視距を確保することを目的に決められており、照明設備との関連を含め PIARC の推奨値[1]をもとに走行速度 80 km/h で 100m 当りの透過率 50%として決めている。

CO は、トンネル内最長滞在時間（暴露時間）一時間程度で人体に影響の無い 100ppm[2]を採用している。

(１)横流方式

表 1 に示す様にトンネルに並行した換気ダクトを持ち車両からの排出ガス量に相当した新鮮空気を供給し希釈すると同時に排出する方式である。車道内の濃度が一定であり、トンネルの縦流風も一定の特徴を持つ。トンネル内は、濃度や流れの変動が少ない質の良い環境が得られるが、車両の通行する空間の他に送（給）排気ダクトを必要とするため建設費ばかりでなく維持動力費も高価格となり他の対応方法が難しい長大トンネルに採用されている。換気計画は、本体の計画と共に行われ地質の状況、施工方法、換気坑の位置等によりトンネル断面が変わる。日本の代表的なトンネルの計画例を表 2 に示す。

①　恵那山トンネル

恵那山トンネルは、地質が悪く大きなトンネル断面を掘削することが困難であった。そこで、トンネル断面は、車両の走行に必要な最小断面として、天井部は温度の高めの車両からの排出ガスや火災時の煙を排除し易い様に排気ダクトを大きく確保し、新鮮空気は本坑に並行する別線の換気坑により分散して天井部に送り込む方式を採用している。このため、天井部の送気ダクトは、小断面となっている。

②笹子トンネル

笹子トンネルは、地質状況が比較的良好で、供用後の交通量の急激な伸びが予想されていた。この交通量に対応するために新たに本坑に並行に換気坑（水平坑）が必要なことが分かり４換気系で計画されていた水平坑（換気ダクト）を本坑に吸収させ２換気系として将来に備えた。この水平坑を本坑に吸収させた範囲の断面が大きくなっている。

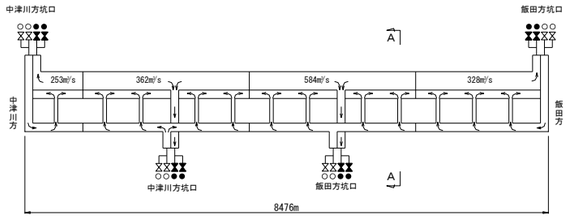
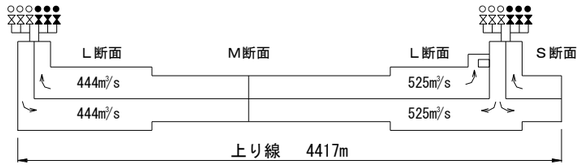
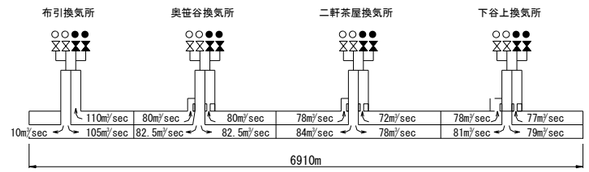
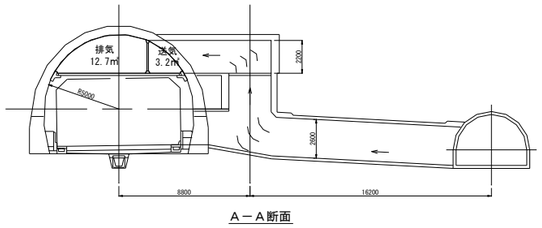
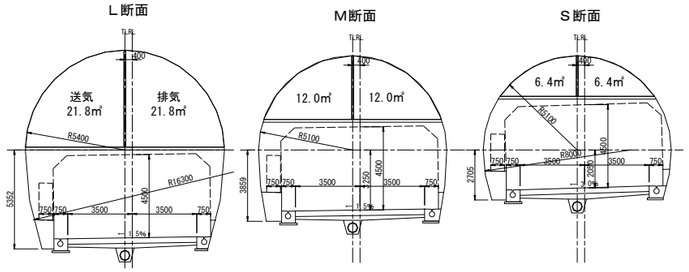
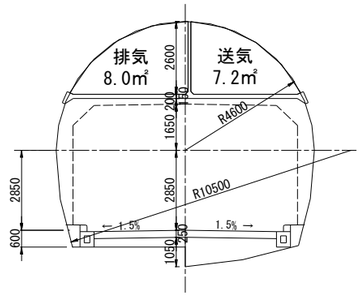
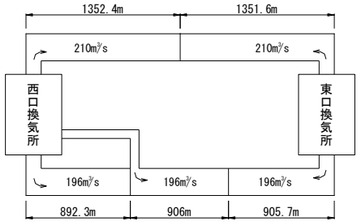
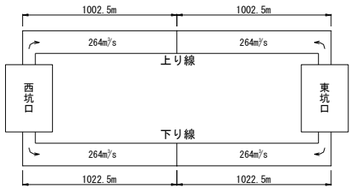
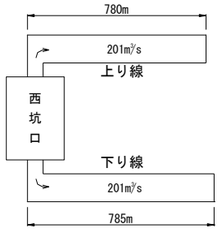
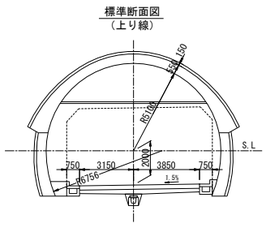
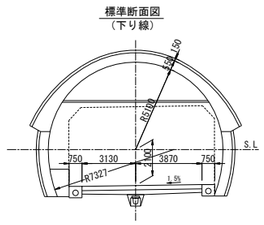
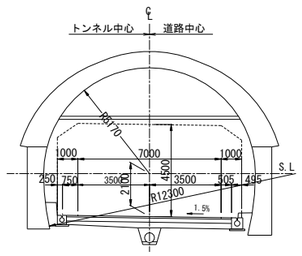
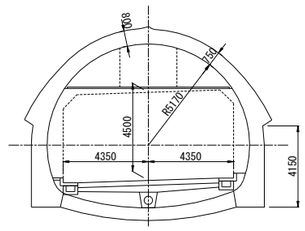
③新神戸トンネル

新神戸トンネルは、対面通行で供用された片勾配のトンネルである。火災時の避難通路の確保に留意し土被りが比較的浅かったことから斜坑を３か所利用し、換気坑兼用の避難通路（送気ダクト）としている。換気坑の数が多い分本坑の換気ダクトの面積が少なくて済んでいる。

（２）半横流式

半横流式は、送気（給気）式と排気式があるが、排気式は、坑口から流入する新鮮空気を十分利用する前に排出し、トンネル内部に入るほど新鮮空気量が減少し濃度が高くなるので送気式を採用してきている。送気半横流式は、横流式の排気のダクトを省略した方式である。従って、トンネル内の濃度は確実に守ることが出来るが供給した空気は坑口より排出されるので高風速の出口風速となる。坑口からの風速が高いと車両が進入するのに危険が伴うので、両坑口から等分に流出すると仮定した風速が８m/s を超える場合横流式を採用している。これまでの日本の道路トンネルの換気系は、３系統まで採用されている（表２参照）。この換気系は、必要となる所要換気量（新鮮空気量）により決まる。１換気系は、走行に必要な断面の上部の空間をダクトに利用できる範囲、３換気系は、２換気系として本坑上部を拡幅してダクトを確保するか、別線で換気坑を確保し本坑断面を抑えた計画とするか経済比較で決まる。今庄トンネル上り線は、下線に比べ所要換気量が大きいので３系統が選定されている。本坑断面は、上下線ほぼ同じ計画となっている。

表 2　横流・送気半横流式換気方式

		恵那山トンネルⅠ期線（対面通行）	笹子トンネル（一方通行）	新神戸トンネル（対面通行）
横流式	換気系統			
	トンネル断面			
	特徴	・地質悪く、本坑最少断面 ・送気は、別線で供給	・2 換気系 ・本坑 3 断面（換気横坑を本線部に収納）	・4 換気系 ・本坑同一断面 ・送排気ダクト断面異なる。（排気若干大：送排気ファン同一口径） ・奥笹谷、二軒茶屋、下谷上換気坑（斜坑で計画されいずれも避難通路として利用）
送気半横流式		今庄トンネル（3 系統）	日本坂トンネル（2 系統）	清見寺トンネル（1 系統）
	換気系統			
	トンネル断面	ダクト面積 13.4m²　　ダクト面積 14.2m²  	ダクト面積 16.6m² 	ダクト面積 13.4m² 

（3）送（給）排気方式

トンネル内への空気の給気及び排気方式は、いくつかの方法が採用されている。その方法は、トンネル構造に支配される。

1）横流式

横流式の基本は、空気を効率よく利用するために給気を下部から、車両からの排出ガスの温度や火災時の排煙を考慮して排気を上部から行う。山岳トンネルの場合は、天井部に給排気ダクトを持つが、給気はフリューにより下部から供給する方法を採用している。また、開削トンネルの場合は、サイドからの給排気している例もある。

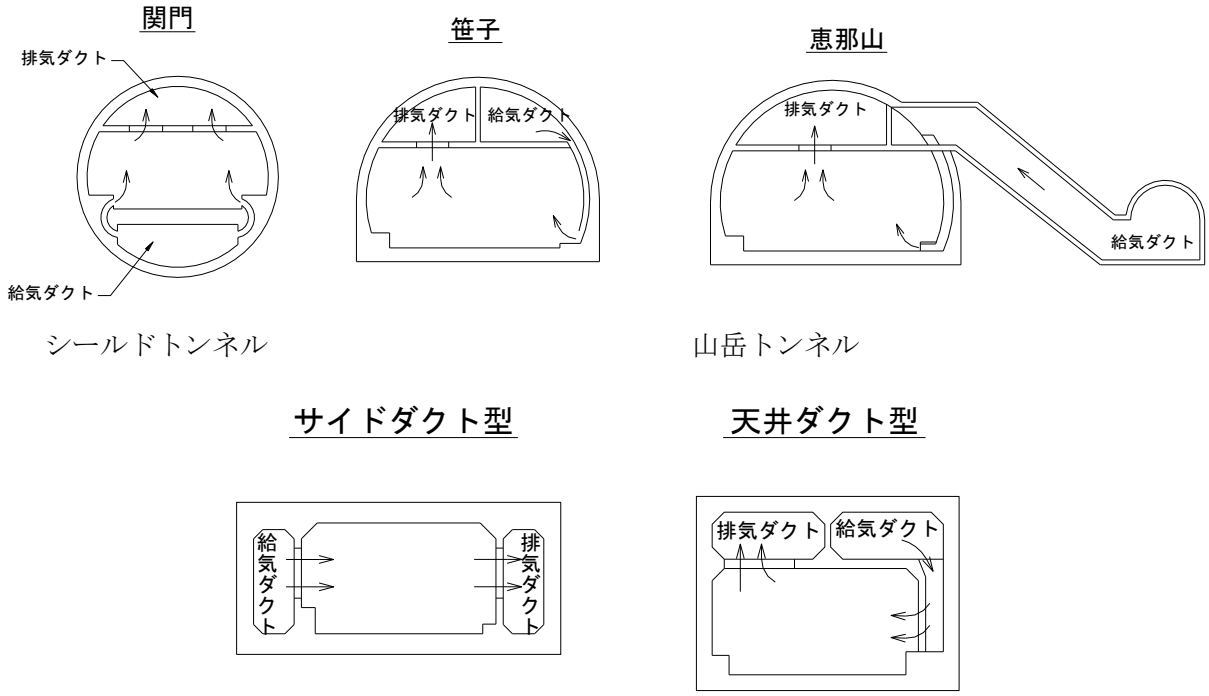
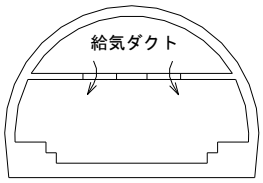


図 1　横流式給排気方式

2）送気半横流式

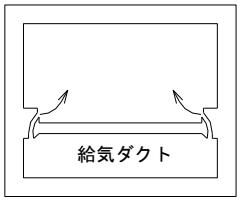
送気半横流式の場合も横流式と同様、下部からの新鮮空気の供給が望ましいが、山岳トンネルでは、火災時の排煙を考慮し天上部に設置されている。開削トンネルでは、サイドや下部に設置される例もある。

東名・名神



山岳トンネル

下部ダクト型

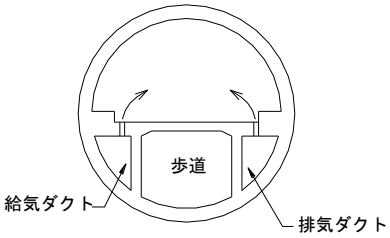


開削トンネル（都市トンネル）

図 2　送気半横流式給排気方式

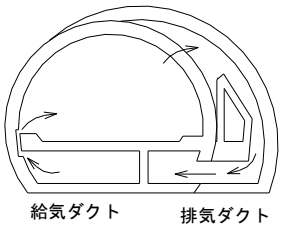
海外のトンネルの例を以下に示す。

Mersey-Liverpool



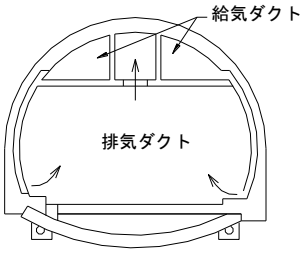
送気半横流式

Mont-Blanc



送気半横流+排気式

Belchen



横流式

（4）縦流換気方式

縦流換気方式は、点で直接車道に新鮮空気を供給及び排気することで換気する方法である。日本で採用している方式には次のものがある（表1参照）。

① 集中排気式
② ジェットファン式
③ 送排気式
④ 電気集塵式
⑤ 電気集塵機付送排気式

1）集中排気式

集中排気式には、用途によりトンネル内走行環境用と坑口環境対策用の二つがある。

トンネル内走行環境対策用は、主に対面通行で採用される方式でありトンネル中央付近に排気口を設けそこに換気機を設置し排気することにより両坑口より新鮮空気を持ち込み換気する方式であり両坑口の環境保全対策にも有効である。車道の縦流風速が6m/s程度以下、立斜坑等換気坑が造り易いトンネルで採用されている。一方、環境対策用は、一方通行で坑口からトンネル内空気の排出を抑制する事が望まれる都市又は都市近郊で採用されている。

2）ジェットファン縦流式

ジェットファン縦流式は、トンネルの車道空間に小型の軸流ファンを設置しその噴流効果で坑口より新鮮空気を持ち込み換気する。本方式の特徴は、換気機の設置や取り外しが容易なので交通条件により対応がし易いこと、可逆式運転が可能なので対面通行トンネルでは上下交通の比率により方向を変えて交通換気力を利用する経済的な運転が出来ること、車道内に直接設置するので維持管理のために交通規制等の措置が必要となること等が挙げられる。

3）送排気式縦流換気方式

ジェットファンの替りにトンネルの中間に排気口と送気口を設け、汚染空気を排出、新鮮空気を供給することで車道内の縦流風を抑え、ジェットファン方式で対応できないトンネルに採用されている。都市間高速道路トンネルでは、電気集塵機が開発されるまでの一時期採用されている。

4）電気集塵式縦流換気方式

電気集塵式は、煤煙で換気規模が決まるようなトンネルで途中に集塵室を設け、煤煙を除去することによりトンネル内の空気を再利用する方式である。この方式の特徴は、集塵室を設置することにより送排気式の換気坑（送排気坑）を省略できることである。

5）電気集塵機付送排気式

電気集塵機付送排気式は、電気集塵機の処理回数が増えることによる異臭を防ぎCO濃度を守るため途中で空気を入れ替える送排気坑を設ける方式である。電気集塵機だけでは対応できない長大トンネルに採用されている。

２　換気方式と対象路線

日本の道路トンネルの換気方式は、トンネル延長や交通量および車速のような交通特性に加え、地域特性に応じ都市間高速道路(自動車専用・有料)、都市内高速道路（自動車専用・有料)、一般道路（無料）に分けられ発展してきた。対象路線ごとに代表的なトンネルと換気方式を表 4 に示す。

対象路線ごとの換気方式別トンネル数を整理すると表 3 のようになる。また、図 3 に路線ごと、換気方式ごとに 6 年間毎の累計を比率で示す。

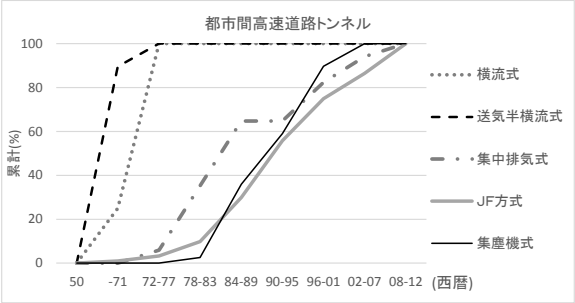
表 ３　換気方式別トンネル数

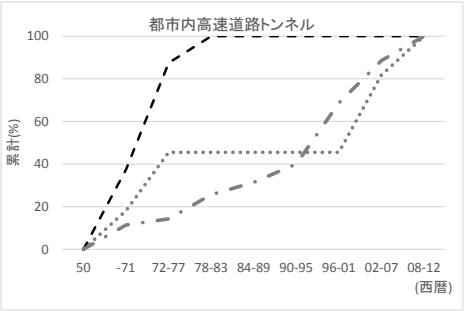
	横流式	送気 半横流式	縦流式			
			集中排気式	電気集塵式	送排気式	ジェット ファン式
都市間高速道路 トンネル	4	19	17	39	7	40
都市内高速道路 トンネル	11	6	39	0	2	1
一般道路トンネ ル	0	28	40	0	0	525
計	15	55	96	39	9	926

*1. 集中排気式には、選択排気式を含む

*2. 集中排気式は、組み合わせを含まない

*3. 電気集塵式には、送排気等組み合わせを含む。ちなみに組み合わせ式は 11 本である。





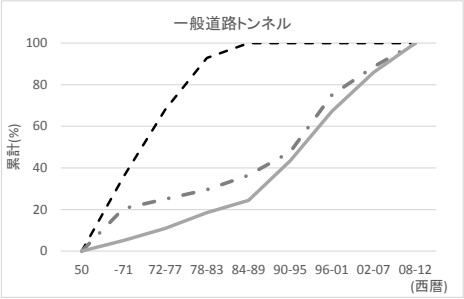


図 3　換気方式ごとの累計比率

表 3、図 3 から次のことが分かる。

① 横流式の採用は、都市内高速道路トンネル及び都市間高速道路トンネルが主体である。ただし、都市間高速道路トンネルは、1977 年の笹子トンネルが最後となる。都市内高速道路トンネルの場合 2010 年の山手トンネルまで続く（表 4 参照）。

② 送気半横流式は、都市間、都市内高速道路ともに 1978 年代までに採用がなくなったが一般道路で 1989 年に加久藤トンネル（Ｌ＝1808m）で採用されている（表 4 参照）。加久藤トンネルは、供用当初（1972 年）より送気半横流で計画されており天井版（直打ち）が設置されていた。交通量の増加に伴い 1989 年に換気機が設置されている。

③ 集中排気式は、走行環境を対象、坑口環境を対象、両方を兼ねる場合がある。坑口環境を対象とする場合は、これからも採用され続くであろう。現実に都市間、都市内高速道路トンネルともに 2012 年まで採用されてきている。

④ 集塵式は、都市間高速道路トンネルのみで採用されており最終は、2007 年八王子城跡トンネルとなる（表 4 参照）。なお、集塵処理が連続して３回以上、または CO 濃度が設計値を越える場合は送排気式との組合せ方式を採用している。

⑤ ジェットファン式は、都市内では、殆ど採用されず都市間高速道路トンネルでは 1978 年代から急に増加してきている。また、一般道路トンネルでは、1984 年代から増加の傾向にある。

表 4　日本の代表的な道路トンネルの換気方式

年代	関門トンネル：3461m：横流換気方式:1958年（機械換気を設置した最初のトンネル）											
	都市間高速道路				都市内高速道路				一般道路			
	トンネル名	延長（m）	換気方式	備考	トンネル名	延長（m）	換気方式	備考	トンネル名	延長（m）	換気方式	備考
1963	天王山	1,454	送気半横流	最初の送気半横流	汐留	286	局所送排気縦流					
		1,390	送気半横流			280	局所送排気縦流					
1964					千代田	2,387	横流		新笹子	2,952	送気半横流	
						1,480						
					霞が関	781	送気半横流					
1966	奥田	630	JF縦流式(Φ 600)	最初のJF縦流					魚見山	860	斜坑排気	中央排気
1967									西栗子	2,675	送気半横流	
									東栗子	2,376	送気半横流	
									張碓	620	JF縦流式（Φ 600）	国産1号
									新宇津之谷	844	立坑排気	中央排気
1968	小仏Ⅰ期	1,642	送気半横流						六甲山	2,843	送気半横流	
1969	弁天山	968	JF縦流式		羽田	300	局所排気縦流		芦原	770	JF縦流式	
	日本坂	2,005	送気半横流			300						
		2,045	送気半横流									
1970									御坂	2,778	送気半横流	
									紀見	1,453	送気半横流	
1971									佐敷	1,570	立坑排気	中央排気
1973	小仏Ⅱ期	1,619	送気半横流		八重洲	1,400	横流		矢ノ川	2,076	送気半横流	
									仲哀	1,220	JF縦流式	
1975	恵那山Ⅰ期	8,649	横流									
	網掛Ⅰ期	1,943	送気半横流（排煙口付）									
	福島	880	JF縦流式	Φ 1000開発								
		909										
1976					新神戸	6,910	横流		仙岩	2,540	送気半横流	
					東京港海底	1,325	送気半横流（局所排気付）	沈埋トンネル				
						1,325						
1977	敦賀Ⅰ期	3,175	送気半横流	最期の半横流	三沢	448	集中排気	環境保全	新日本坂Ⅰ期	2,205	送気半横流(局所排気付)	
	今庄	2,755	送気半横流			344	JF縦流		下呂	1,232	JF縦流(Φ 1000)	
		2,756			川崎港海底	1,160	送気半横流（局所排気付）	沈埋トンネル	城山	1,340	JF縦流(Φ 1000)	
	笹子	4,417	横流	最期後の横流		1,160			遠坂	2,585	送気半横流	
		4,414										
1978	大佐Ⅰ期	1,572		Φ 1000					鳥居ﾄﾝﾈﾙ	1,738	送気半横流	
									月山第2ﾄﾝﾈﾙ	1,530	送気半横流	
1979	敦賀Ⅱ期	2,925	電気集塵機縦流	試験施工					三国ﾄﾝﾈﾙ	1,218	JF縦流	
1980	冠山	2,198	集中排気縦流						みちのく	3,172	送気半横流	
	谷稲葉	1,355	JF縦流	Φ 1500開発								
1981	山本山	1,839	JF縦流	Φ 1000					長等	1,305	集中排気縦流(環境対策)	
		1,804		Φ 1000					笹谷Ⅰ期	3,384	送気半横流（排煙口付）	
1982	真鶴	1,565	集中排気縦流	環境保全					駒止	2,010	JF縦流(Φ 1000)	
	竜ヶ森	1,922	JF縦流	Φ 1500								
1983	加計西	2,691	送排気縦流		花園橋	462	選択局所排気縦流	環境保全	正丸	1,918	JF縦流	
						324						
1985	関越Ⅰ期	10,920	電機集塵機付送排気						鵜ノ田尾	1,769	JF縦流	
	恵那山Ⅱ期	8,625	電機集塵機付送排気									
1987	花立	922	JF縦流	Φ 1250開発								
	志和	2,210	立坑送排気縦流	環境保全								
		2,110	JF縦流									
1988	関戸（上）	3,325	電気集塵機縦流									
1989	武田山(下)	1,712	集中排気縦流	環境保全					加久藤	1,808	送気半横流	一般道最後
1991	関越Ⅱ期	11,055	電機集塵機付送排気		御苑	840	集中排気縦流	環境保全	銀河	3,388	JF縦流(Φ 1500)	
	笹ヶ峰	4,309	JF縦流			840						
1993	笹井山	3,197	電気集塵機縦流									
		3,181										
1994					多摩川	2,170	サッカルド付送排気	沈埋トンネル				
						2,170	サッカルド付集中排気					
1995	加久藤	6,213	電機集塵機付送排気									
1996	五里が峰Ⅰ期											
1997	アクアライン	9,607	電機集塵機付送排気	海底トンネル					安房	4,370	集中排気縦流	
		9,607										
	阪奈	5,578	電機集塵機付送排気									
		5,576	集中排気縦流									
1998									雁坂	6,625	集中排気縦流	
2002					東山	3,190	集中排気付横流	環境保全				
						3,560			新日本坂Ⅱ期	3,104	JF縦流(高風速Φ 1000)	Φ 1000開発
2003					神戸永田	3,900	横流					
									愛別	2,955	JF縦流(高風速Φ 1250)	
2004	五里が峰Ⅱ期		電気集塵機縦流						才谷	2,422	JF縦流(高風速Φ 600)	Φ 600開発
	太郎山Ⅱ期		電気集塵機縦流									
									小鳥	4,370	JF縦流	
2006					新都心	2,877	集中排気縦流式	環境保全				
						2,873						
									仙人	4,485	JF縦流	
2007	八王子城跡	2,407	JF縦流	最後の電気集塵機	秋田中央道	1,975	集中排気縦流		早坂	3,115	JF縦流	
		2,364	排気付電気集塵機縦流						新八鬼山	3,992	JF縦流	
2008	鈴鹿	4,010	JF縦流	新名神					甲子	4,349	JF縦流	
		3,938										
	箕面	5,672	集中排気縦流									
	飛騨	10,710	選択排気縦流									
2010					山手	10,900	横流	最期の横流				
						10,900						
2011	温海	6,022	JF縦流						三遠	4,525	JF縦流	
									石樽			
2012	大万木	4,878	JF縦流						八鹿	2,990	JF縦流	
2013					正連寺川	3,320	集中排気縦流	都市内長大最初の縦流＊				
						3,320						

＊トンネル内分岐合流あり

３　換気方式の変遷とその背景

３－１　最初の導入

日本で最初に道路トンネルに換気設備が導入されたのは、関門海峡を横断する延長 3,461m の関門トンネル(対面通行)であり、1958 年のことである。当時、自動車の有害ガスの排出量は多く、トンネル内環境（CO＜400ppm）を維持するためには毎秒 780m^3 の大容量の新鮮空気（換気量）が必要であった。換気量が多く、長大トンネルであることから、換気の質が高く確実な換気を行うために、1920 年代に米国で考案された Holland Tunnel（ L=2,610m：1927 年）の横流換気方式[3],[4]を参考に日本で独創的な給排気方法が発案され採用されている[5]。それは、それぞれの換気塔に 3 台の換気機と換気ダクトそのダクトを並行に設置し 7 か所のダンパを設けそれを切り替えることにより故障や点検時に対応させる方法である。

関門トンネルは、4 本の換気立坑を有し、8 系統の送排気ダクトを有する。図 4 に関門トンネルの換気系の概要を示す[6]。

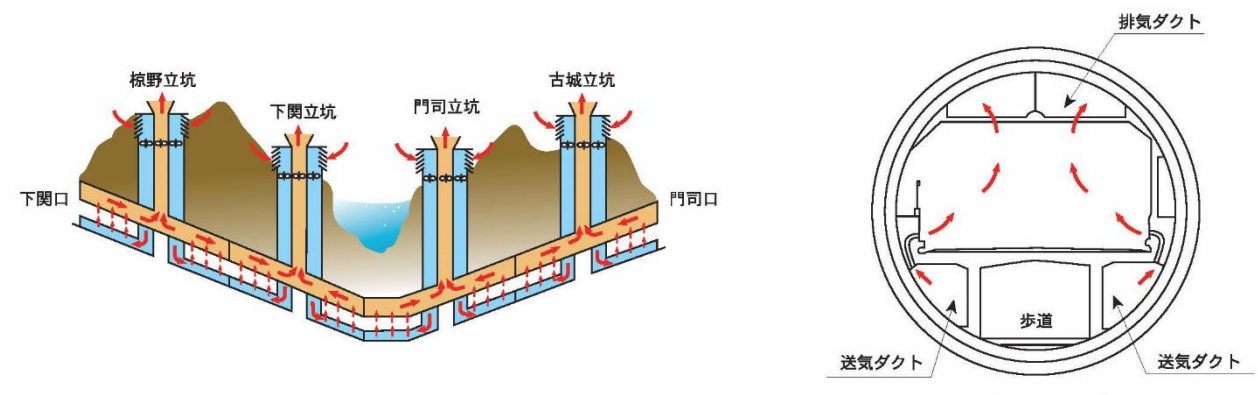


図 4　関門トンネルの概略換気系統

３－２　都市間高速道路トンネル

1960 年～1970 年に掛けて、日本の高速自動車道路の幕開けとなる大阪周辺の各都市や東京と名古屋を結ぶ名神・東名高速道路のトンネルを対象に換気計画が行われた。この路線の最長となる日本坂トンネルは、延長 2,000m 程度であるが、大都市を結ぶ高速道路であるため交通量が多い（東名高速で 3,100 台/h）特徴を有する。最大 530m^3/ｓの換気量が必要となり坑口からの吐出風速が 6m/s 程度であることから、英国で開発された Mersey Tunnel （L=3,226m:1934 年）を参考として送気ダクトのみを設置する送気半横流方式が 500m 以上のトンネルに採用された [7],[8]。送気半横流式は火災時にファンを逆転運転することにより排煙を行うことも採用の条件であった。その後、路線の拡大とともに延長が長い数多くのトンネルが予想され経済性が求められた。

図５に都市間高速道路トンネル数の累計を示す。1970 年代後半までは、送気半横流方式を中心にトンネル数が増加した。ただし、延長４ｋｍを超える３トンネルは、（一方通行２本：笹子トンネル 4,417m）、（対面通行１本：恵那山トンネル 8,649m）、送気半横流式では出口風速が制限を超えるので横流換気方式が採用された。

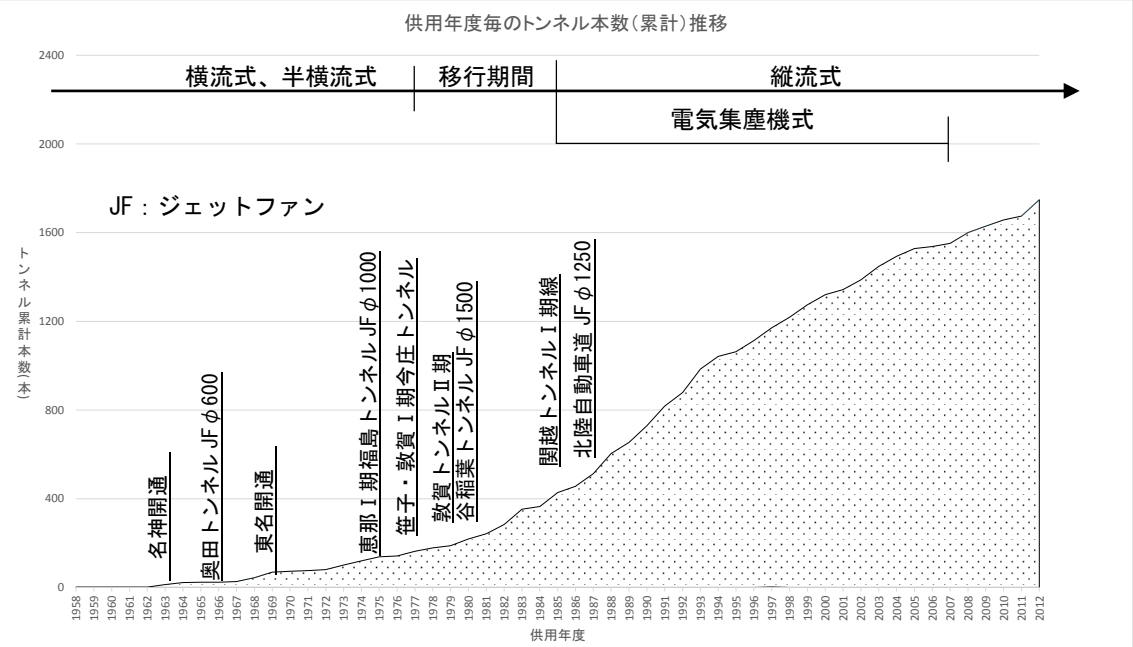
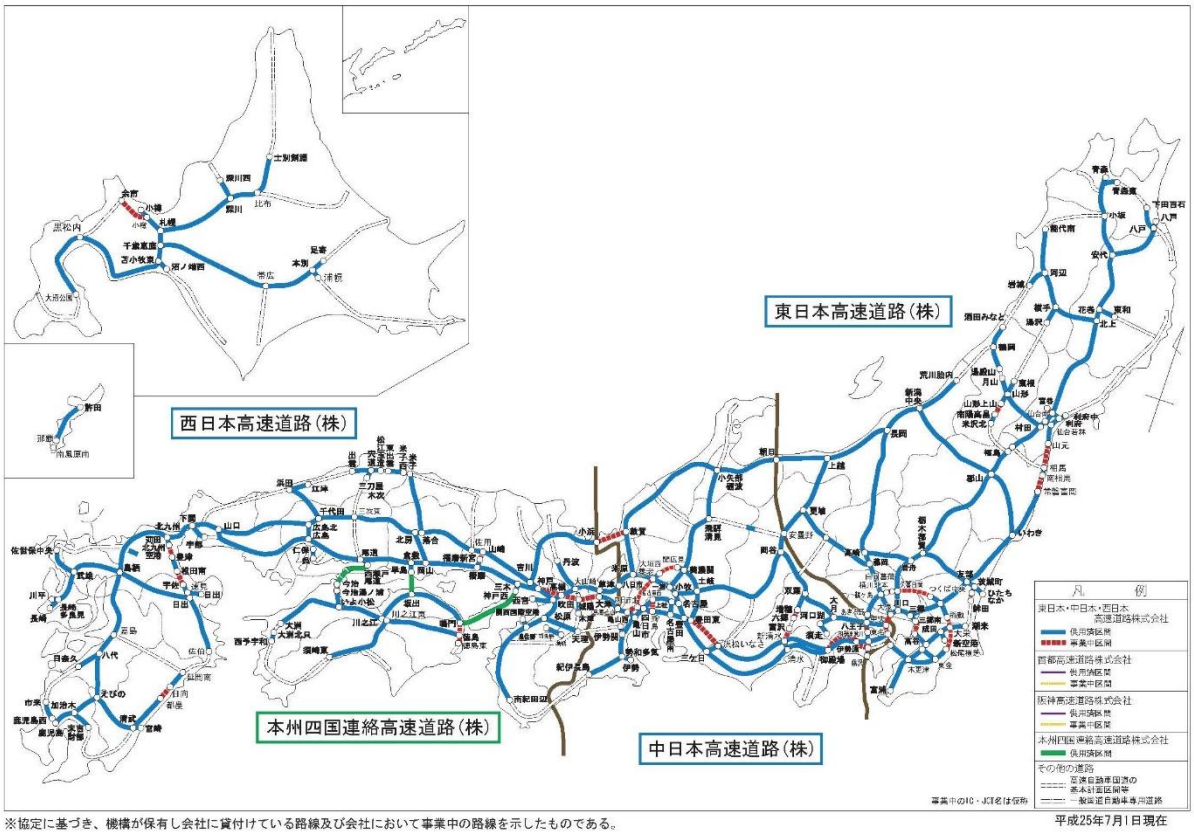


図　５　都市間高速道路トンネルの本数の累計

1970 年代後半から、路線延長の拡大と共にトンネル本数が急激に増加し、経済的な換気方式が求められるようになった。1966 年には供用中のトンネルの交通量の増加に伴い機械換気が必要になった延長 634m の奥田トンネルにジェットファンが試験的に設置されて以降、縦流換気方式の研究が本格的に始まった[9]。縦流換気を採用するトンネル内空気の濃度データ、交通量調査、車種構成等の長年に渡る実態調査や車両の抵抗係数や送排気装置の実験等[10]の蓄積から、1970 年代後半から長大トンネルへも縦流換気方式が採用され始め、以降のトンネルは経済性の高い縦流換気方式が主流となった。



※協定に基づき、機構が保有し会社に貸付けている路線及び会社において事業中の路線を示したものである。

平成25年7月1日現在

図 6　都市間高速道路線網図［11］

長大トンネルは、トンネルの中間に空気の入れ替えのための換気坑が必要であり（表 1 参照）、立地条件の制約やコストがかかる問題（国立公園、急峻な地形等）があった。図 7 は、換気の対象物質である煤煙と CO の設計基準が整理された以降の大型車混入率 30%を例に所要換気量を算定し、1975 年の CO 換気量を基準に比率を求めたものである。長大トンネルに換気立坑が必要となる支配的な要因は、図 7 に示すように 2005 年までは煤煙に対する換気量である。CO 換気量との差（図 7 では 6 倍程度）を利用し、煤煙の換気量を確保するために外気と接続する換気坑（立斜坑）の代わりにトンネル本坑にバイパス風路を設け、電気集塵機（集塵効率 80%）で煤煙を除去し空気を再利用する方式が開発され、1979 年に敦賀トンネルに試験的に設置された。1985 年に関越トンネルで本格的に採用され［12],［13］運用上問題ないことが確認されるとそれ以降の長大トンネルは電気集塵機方式の縦流換気方式が主流となり、2007 年までに 39 トンネル（総処理風量 16,000m^3/s）で採用された。電気集塵機方式を採用するトンネルで最大規模のトンネルは、関戸トンネル（L＝3,325m：供用 1988 年）であり、計画集塵処理風量は、855m^3/s（集塵室 3 ヶ所）に達する。このときの煤煙の所要換気量は 1,400m^3/s で CO 換気量に対し 8 倍程度の値となっていた。敦賀トンネルに電気集塵機が試験施工されてから関越トンネルに本格的に採用されるまでを移行期間と位置づけた。この間は、換気坑を有する送排気縦流式（加計西トンネル：L＝2,691m）や集中排気縦流式（冠山トンネル：L＝2,198m）が採用されており、関越トンネルに利用するジェットファン（φ1500：谷稲葉トンネル L＝1,355m にて試行）が開発された。

2006 年以降は自動車排気ガス規制の効果が顕著になり、煤煙に対する所要換気量が大幅に減少し、CO 換気量との差が少なくなり電気集塵機の利用効果が無くなった（図 7 参照）。換気用とし

て最後に採用されたトンネルは、2007 年供用の八王子城跡トンネル（L＝2364m）である（表 3 参照)。このころ計画されたのが飛騨トンネル（L=10,710m,対面通行：2008 年供用）で、換気方式は、換気量や集塵機の利用効果の減少、対面通行やトンネル構造（TBM:下部ダクト）等から排気口を 5 箇所設置した選択排気縦流式を採用している。その後、一方通行長大トンネルでもジェットファンによる縦流換気が可能となった。なお、1980 年代後半から生活圏内(山陽道等）にトンネルが計画されるようになり坑口近辺の環境へ排気ガスが与える影響を低減することが求められ、出口坑口近傍に排気口を設け、排気塔からの拡散、集塵処理してから排出する対策が採られるようになった（坑口集中排気縦流方式)。

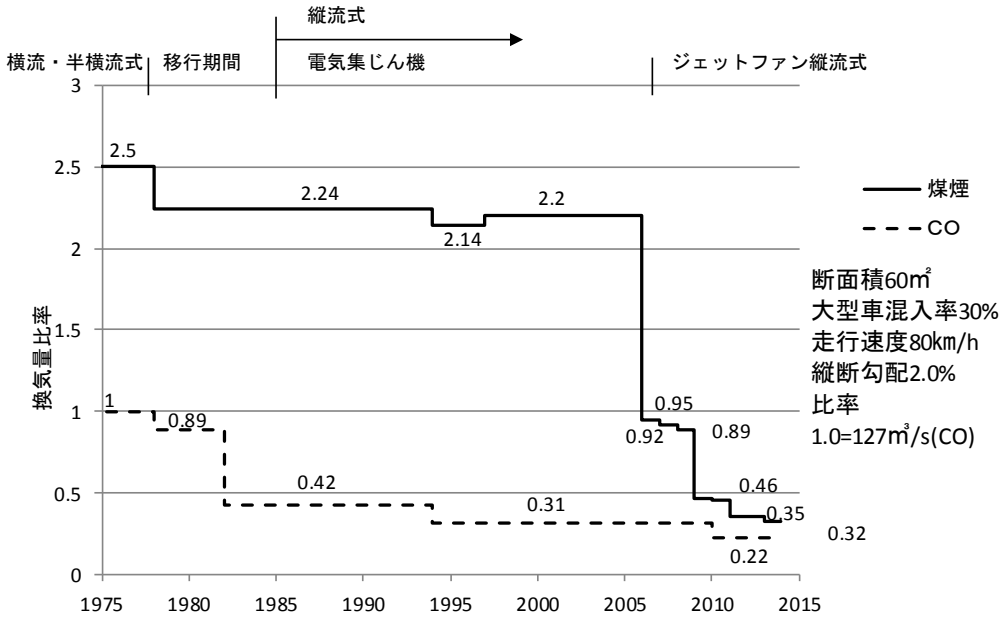


図 7　所要換気量の推移（地方部対象）の一例

３－３　都市内高速道路トンネル

都市内高速道路トンネルは、東京・阪神や名古屋等の大都市圏に 60 本程度あり、重交通、トンネル内の分合流、周囲環境への配慮等特殊な特徴を持っている。首都圏の最初となる主要なトンネルは、環状線のトンネルであり都市間高速道路が計画された時期と重なる。従って、1960 年代～1970 年代は、横流式、送気半横流式、短い分岐合流の無いトンネルは交通状況に応じ排気口位置を選択する選択排気縦流式（集中排気に分類）が採用されており、その後は、坑口対策を考慮しジェットファンと組み合わせた坑口集中排気縦流式、沈埋トンネルにおいては、坑口サッカルド方式と組み合わせた坑口集中排気縦流式も採用されている。また、トンネル内に分合流がある長大トンネルの場合、ランプ部を含め分岐合流部の交通流（渋滞含む）と車道内流量の関係を把握することが難しく、確実に新鮮空気を供給できる横流式が山手トンネル（L=10,900m：2010 年供用）に採用されており、都市長大トンネルに縦流式を採用するのは、都市間高速道路より 30 年程度経過してからとなる。図 8 に示す様に 2013 年に縦流換気方式を採用した正連寺川トンネル（L＝3,321m：阪神高速道路）が供用され、現在 6 本のトンネル（中央環状品川線 L=10.9km、横浜環状北線 L=6km、大和川線 L=8km 区間）が施工中であり外郭環状線（L=16.5km)の計画も進められている。

2007 年以降供用されたトンネルには、外部環境対策用に除塵（フィルタ、電気集塵機）及び NO_2 除去装置が設置されている。1973 年既設のトンネルの環境対策用として除塵装置が八重洲トンネル（首都高速道路）に設置されてからこれまでに、環境対策用空気処理の規模は、2013 年現在（除塵フィルタ：24,000m³/ｓ、電気集塵機：14,000m³/ｓ、脱硝（NO_2）：4,000m³/ｓ）に達する。

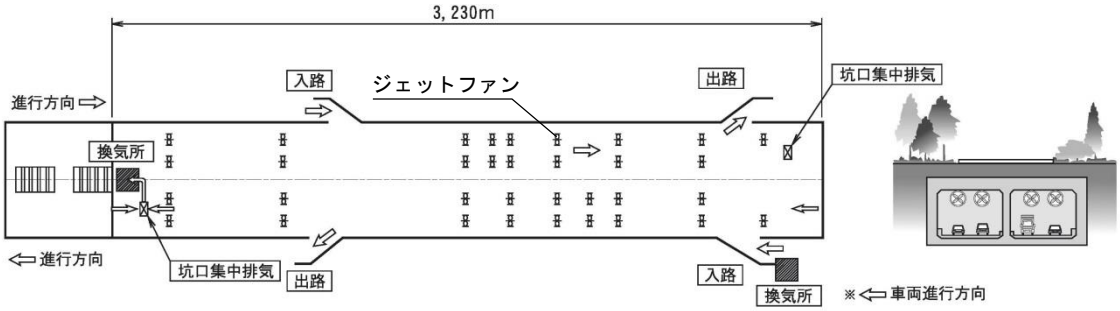


図 ８　分合流の有る都市トンネル縦流換気方式採用の一例

３－４　一般道路トンネル

一般道路トンネルは、国や地方自治体の管轄するトンネルであり、数が一番多く対面通行が一般的である。トンネル換気が対象となった当初、延長が短く交通量も少ない対面通行の場合、トンネル中央に換気坑を設置し鉱山で経験のある集中排気が採用された。1960 年代中頃から 1980 年代初期にかけ延長 2～3,000m程度のトンネルは､排煙機能を持つ送気半横流式を採用しており、都市間高速道路トンネルで縦流化が進められると坑口対策を兼ねて 6,625mのトンネル（雁坂トンネル）に集中排気縦流式が採用されている。それ以下の延長のトンネルは、ジェットファン縦流式が採用されている。また、近年は、排出ガス規制の効果により長大トンネルでもジェットファン縦流式が採用されてきており、都市近郊に計画されるトンネルが増えてきたので坑口対策のために坑口集中排気縦流式が採用される例も増えてきている。

３－５　換気方式の採用とその背景

日本の道路トンネルの換気方式を都市間、都市内高速道路トンネル及び一般道路トンネルに分け整理したが、それぞれに特徴が有り、またその背景が異なる中で換気方式が選定されていることが認められた。初期段階(1970 年代まで)は、海外の技術に依存した時代であり、文献取集や実態調査が数多く行われ質が高く安心できる方式が採用された。その後、路線が整備されるとともに数多くの長大トンネルの計画が浮上し経済的な縦流式を採用しつつ、換気坑不要の電気集塵機が開発され長大トンネルでは主要の換気方式となった。これは、トンネルで対応する技術であるが 1990 年代中頃の西淀川や川崎公害訴訟の和解を受け発生源での対応が行われる方向になり 1989 年には排出ガスについて中央環境審議会が答申を行なった。その内容は 2007 年までに粒子状物質を大幅に削減する計画であった。この答申が実施されてからトンネル換気の対象物質である煤煙の排出量が大幅に減少し、トンネル換気方式、規模を決める主要因であった煤煙の換気量が減少し CO の換気量との差が少なくなり電気集塵機を利用する効果が無くなった。しかし、煤煙の排出量が減少したことでトンネル中間部の空気の入れ替えの必要が無くなりジェットファン方式の採用が増えてきている。一方、都市内高速道路の長大トンネルの場合、換気規模は縮小した

もののトンネル構造が複雑で分岐合流部の交通の流れと空気の流れの関連、渋滞対策、火災時の煙の流動等を把握するのに時間を要し都市間高速道路に比べ縦流式の採用が 30 年程度遅れた。

表 5　対象路線の特徴と換気方式採用の背景

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>都市間高速道路</th><th>都市内高速道路</th><th>一般道路</th></tr>
<tr><td rowspan="5">特徴</td><td>交通量</td><td>中～大</td><td>大</td><td>小</td></tr>
<tr><td>用途</td><td>自動車専用道路</td><td>自動車専用道路</td><td>自動車・歩行者</td></tr>
<tr><td>交通方式</td><td>一方通行(段階建設有)</td><td>一方通行</td><td>対面通行</td></tr>
<tr><td>トンネル</td><td>単純</td><td>複雑
(トンネル内分合流)</td><td>単純</td></tr>
<tr><td>管理体制</td><td>24 時間</td><td>24 時間</td><td>－</td></tr>
<tr><td rowspan="5">背景</td><td>初期</td><td colspan="3">換気技術の不足(海外技術の利用)
↓質の高い方式の採用(排煙機能含)
横流、送気半横流方式の採用</td></tr>
<tr><td>発展期</td><td>路線の拡大に伴うトンネル数の増加。
40 本を超える長大トンネル(3 km以上)の計画
↓経済性
縦流方式の採用
(電気集塵機の開発)</td><td>環境対策を重視
↓
短いトンネル
：排気式の採用
長いトンネル
：横流+集中排気の組合せの採用
換気塔からの排出ガス処理</td><td>トンネル延長 3000m 以下が多く、交通方式に配慮
↓
送気半横流、集中排気(中央排気)、ジェットファン式の採用</td></tr>
<tr><td rowspan="3">現状</td><td colspan="3">・川崎、西淀川等公害訴訟
↓排出ガス規制の強化(中央環境審議会答申：1989～2007)
排出ガス規制効果（煤煙の排出量の大幅な減少→換気量の減少）
・ジェットファンの高性能化(高効率、高風速)</td></tr>
<tr><td>・煤煙と CO の換気量差がなくなり集塵機の利用終了
・換気量減少に伴い排煙専用設備が増加
・都市近郊の計画増</td><td>・大深度化、換気技術の進歩
↓
長大トンネルの計画
火災時の煙のコントロール（排煙専用）</td><td>・換気量の減少
・都市近郊の計画増</td></tr>
<tr><td colspan="3">・ジェットファン縦流式の採用
・坑口集中排気縦流式の採用（坑口対策)延長によっては送排気との組み合わせ</td></tr>
</table>

４　換気方式に大きな影響を与えた要因

換気方式が変わってきた、大きな要因として換気対象物質の排出量の削減と長大トンネルの縦流化、ジェットファンの技術的進展等がありこれについて詳述する。

４－１　換気対象物質と設計濃度及び排出量

（１）換気対象物質

現在、電気自動車や燃料電池車等の化石燃料を使用しない自動車が出てきているが、まだ化石燃料を使用する割合は大きい。化石燃料を使用する自動車は、走行に伴い排出される物質には、一酸化炭素や窒素酸化物などのガス状物質と煤煙と称させる粒子状物質がある。その主体は、一酸化炭素（CO)、窒素酸化物（Nox)、及び粒子状物質があげられる。

首都高速道路で測定されたデータ[14]によれば、煤煙の透過率50%を確保できればCOは50ppm以下であり、NOxは3ppm以下となり国内や海外の設計濃度を下回る値となっている。このような測定データから換気対象物質は、整理的影響を与える物質としてCO、視認性に影響を与える物質として煤煙をそれぞれの代表として採用してきている。

（２）設計濃度と排出量

日本で最初に換気機が設置された関門トンネルでは、アメリカにならいCOを対象に新鮮空気量（所要換気量）を決めていた。しかし、供用後に煤煙による見通し距離が非常に悪化することが認められその後煤煙を対象としている。

海外ではガソリンを燃料の主体としているので、COにより換気量を決定しておけば見通し距離に対して問題が無かったが、日本の場合軽油が税金面で優位にありディーゼル機関が多く利用された結果であった。

関門トンネルでは、独自にスモークメーターを開発し、その原理が現在に引き継がれ煙霧透過率計として利用されている。換気規模を決める基になる所要換気量は、交通条件、排出量と設計濃度によって決まる。関門トンネルの排出量及び設計濃度は、以下のとおりであった。

表　６　関門トンネル排出量の想定と設計濃度及び所要換気量

換気対象物質	設計交通量	単位排出量	設計濃度	所要換気量
CO	2000(台/h)	平均54.4(l/min・台)	400(ppm)	780(m^3/s)
備考	・計画時煤煙の排出量のデータなし ・CO排出量、設計濃度等は米国データ採用			

関門トンネル以後は、国内での試験調査結果や社会情勢の変化に伴う車両技術の進歩等から排出量や設計濃度が変わってきている。

表 7　設計(許容)濃度及び排出量に関する基準

	対象又は基準
1950 年代	関門トンネル　［15］
1960	名神高速道路トンネルの換気量及びその算定基礎　［16］
1964	トンネル換気設計要領　［17］
1969	トンネル換気設計指針　［18］
1975	道路トンネル技術基準（案）　［19］
1975	道路トンネル便覧　［20］
1976	道路トンネル換気設計指針（案）　［21］
1978	設計要領第 3 集（2）トンネル換気　［22］
1984	トンネル換気設計指針（案）　［14］
1985	道路トンネル技術基準（換気編）・同解説　［23］
1993	トンネル換気設計指針（案）　［24］
2001	道路トンネル技術基準（換気編）・同解説　［25］
2003	トンネル換気設計指針（案）　［26］
2006	設計要領第 3 集（2）トンネル換気　［27］
2008	道路トンネル技術基準（換気編）・同解説　［2］
2009	設計要領第 3 集（2）トンネル換気　［28］
2014	機械設備設計要領（トンネル換気設備編）　［29］

注）“設計濃度”という用語は、当初“許容濃度”と表現されていたのが、その後“設計目標値”“設計目標濃度”から 1985 年“道路トンネル技術基準（換気編）・同解説［23］以後“設計濃度”に統一された。

なお、設計濃度は“換気施設の設計にあたって、機械換気による所要換気量、設備容量などを算定する際の基礎となる有害成分濃度の達成目標値”と定義されている。(道路トンネル技術基準（換気編）・同解説 H20 年度改訂版）［2］

１）CO の設計濃度

CO の設計濃度は、人体への影響を考慮して決められてきている。関門トンネルでは、海外の例を参考にして決められてきているが、その後 PIARC の勧告値[1]等を参考に以下のように決められてきている。

(a) 海外の設計値を参考

Holland Tunnel 建設時 Yale 大学の実験によればCO 含有率と生理上、特に健康との関係は、問題ないとして 400ppm を採用している。

関門トンネルでは上記の値を参考として 400ppm を採用している。その後、名神高速道路の計画においては、京大村山教授の CO ガスの空気中の含有率と人体への安全時間と実験結果（図 9 参照）[30] から、CO 濃度 0.02%から徐々に影響が出て 0.1%を変曲点として急激に危険な状態になるとされていて時間も 20 分程度である。この結果及び海外の例等から 250ppm を採用している。

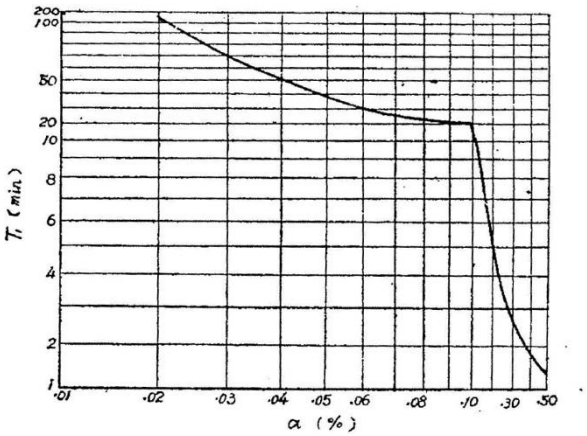


図 9　CO 濃度と安全時間の関係 [30]

表 8　海外トンネルの CO 許容値

トンネル名	供用	許容限界(%)	換気方式
Holland	1927	0.04	横流式 L=2608m
Mersey	1934	0.025(普通) 0.04(ピーク時)	送気横流式 L=3226m
Lincoln	1945	0.04	横流式　L＝2504m
Queens Midtown	1936	0.025	横流式　L＝1912m

これ以後は、PIAC（1967 第 13 会大会）[1] の勧告値を採用し山地・平地部 150ppm、市街地 100ppm を採用し、都市内では重交通を理由として 50ppm を採用していた時期もあったが最終的に 100ppm を採用している。ただし、1983 年に日本産業衛生学会から CO に対する労働衛生上の値として 50ppm※が勧告されたことにより暴露時間が提示されるようになってきた。暴露時間に対する影響は、図 10 に示すものがあり、これによれば 100ppm の濃度で滞在時間が 1 時間程度以内なら問題は生じないとしている。

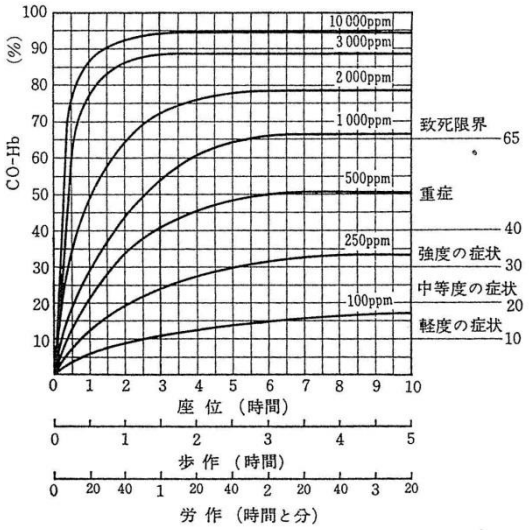


図 １０　吸収した CO 濃度、時間及び動作と血液中の CO-Hb 生成との関係 [31]

※1983 年以前、100ppm“労働衛生上の許容値”

表 9　CO 設計濃度

分類		対象	設計濃度	備考
①	1950 年代	関門トンネル[15]	400ppm	
②	1960	名神高速道路トンネルの換気量及びその算定基礎（日本道路公団）[16]	250ppm	
②	1969	トンネル換気設計指針(日本道路公団)[18]	150ppm (山地及び平地) 100ppm(市街地)	PIARC(1967 年第 13 会大会勧告)
①	1975	道路トンネル便覧(道路協会)[20]	100ppm	
③	1976	トンネル換気設計指針(案)(都市内高速道路)[21]	50ppm	可能交通容量
②	1978	設計要領第 3 集(2)トンネル換気(日本道路公団)[22]	100ppm	1983 日本産業衛生学会の勧告値を発表(CO＝50ppm)
③	1984	トンネル換気設計指針(案)(首都高速道路)[14]	100ppm	暴露時間 1 時間以内
①	1985	道路トンネル技術基準(換気編)・同解説(日本道路協会)[23]	100ppm	短時間
③	1993	トンネル換気設計指針(案)（首都高速道路）[24]	100ppm	滞在時間 1 時間程度
②	1997	設計要領第 3 集(2)トンネル換気(日本道路公団)[33]	100ppm	
①	2001	道路トンネル技術基準(換気編)・同解説(日本道路協会)[25]	100ppm	暴露時間 30 分程度
③	2003	トンネル換気設計指針(案)(首都高速道路)[26]	100ppm	
②	2006	設計要領第 3 集(2)トンネル換気(高速道路)[27]	100ppm	トンネル内滞在時間 30 分以内
①	2008	道路トンネル技術基準(換気編)・同解説(日本道路協会)[2]	100ppm	暴露時間 30 分程度
②	2009	設計要領第 3 集(2)トンネル換気(高速道路)[28]	100ppm	トンネル内滞在時間 30 分以内
③	2014	機械設備設計要領(トンネル換気設備編)(首都高速道路)[29]	100ppm	

①：国の基準　②：都市間高速道路の基準　③：都市内高速道路の基準

２）CO 排出量

CO の排出量は、当初アメリカの資料により関門トンネルでは、ディーゼル車、ガソリン車の平均値ではあるが、54.4（l/（min・台））を採用している。その後、国内（土木研究所、国立衛生試験所、日本道路公団）［32］で国産車についての実験を行い、CO 排出量と燃料消費量の関係が求められた。

P_{CO}＝0.315f－0.019（m^3/s）

f：燃料消費量（l/km）

1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）［18］では、次式を用いて排出量を算定するようにしている。

P_{CO}＝0.315f（m^3/s）、f：燃料消費量（l/km）

1975 年道路トンネル便覧（一般道対象）［20］では、

P_{CO}＝0.315f(f：ガソリン車の燃料消費率)　f＝0.1051/km・台

P_{CO}＝33（l/km・台）

なお、自動車からの排出規制は 1970 年（昭和 45 年）運輸技術審議会、自動車部会において「自動車排出ガス対策基本計画」が算定され、昭和 48、50 年の二段階での排出ガスの低減目標を設定された。これ以後、CO の排出量はトンネルの実態調査結果をもとに決められてきている。

表　１０　一酸化炭素及び煤煙に対する自動車排出ガス規制の概要

排出物質	新・旧	燃料	車種	48 年規制	49 年規制	50 年規制	備考
CO	新車	ガソリン LPG	乗用車	26.0［18.4］(18.0)	－	2.7［2.1］	10 モード
			軽量トラック・バス	26.0［18.4］(18.0)	－	17.0［13.0］	
			軽量トラック・バス	1.6%(1.1%)	－	－	6 モード
		軽油	－	－	980ppm	－	
	使用過程車	ガソリン LPG	－	4.5%	－	－	
ディーゼル黒煙(煤煙)	新車	軽油	－	50%	－	－	最高出力回転数の 40、60、100%における全負荷時
	使用過程車	軽油	－	－	50%	－	無負荷状態でアイドリングから最高回転数鵜までの休息加速時

現状では、実測値をもとにエンジン種別及び車両の大小に関係なく実態調査の結果から１台当たり表 11 に示す値を採用している。

表　１１　現状の CO 排出量

平常時	渋滞時
5(l/km)	7(l/km)

表 １２　CO 排出量の経緯

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>排出量</th><th>備考</th></tr>
<tr><td>1950 年代</td><td>関門トンネル　［15］</td><td>54.4l/min・台</td><td>乗用車：1.48、中型トラック：2.26、小型トラック：1.39、大型トラック 3.03(単位 f^3/min)</td></tr>
<tr><td>1960</td><td>名神高速道路トンネルの換気量
及び算定基礎　［16］</td><td>P_{CO}＝0.31＝f－0.019
(f：燃料消費率)</td><td></td></tr>
<tr><td>1969</td><td>トンネル換気設計指針　［18］</td><td>P_{CO}＝0.315f
(f：燃料消費率)</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th colspan="2">車種</th><th>燃料消費率</th><th>CO 排出量</th></tr>
<tr><td rowspan="2">乗用車</td><td>共通</td><td>0.15</td><td>47.3</td></tr>
<tr><td>小型</td><td>0.10</td><td>31.5</td></tr>
<tr><td rowspan="2">トラック</td><td>共通</td><td>0.28</td><td>88.2</td></tr>
<tr><td>小型</td><td>0.10</td><td>31.5</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>1975</td><td>道路トンネル便覧　［20］
(道路協会)</td><td>P_{CO}＝0.315f
(f：ガソリン車の燃料消費率)
P_{CO}＝3.3(l/min)</td><td>F＝0.1051/km</td></tr>
<tr><td>1976</td><td>トンネル換気設計指針　［21］</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th></th><th>平常時</th><th>渋滞時</th></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>10</td><td>15</td></tr>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>10</td><td>15</td></tr>
</table></td><td></td></tr>
<tr><td>1978</td><td>設計要領第３集　［22］
(2)トンネル換気</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th></th><th>平常時</th></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>15</td></tr>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>15</td></tr>
</table></td><td></td></tr>
<tr><td>1984
～
2001</td><td>トンネル換気設計指針(案)　［14］
道路トンネル技術基準(換気編)・同解説　［23］
設計要領第３集(2)トンネル換気　［27］</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th>平常時</th><th>渋滞時</th></tr>
<tr><td>7</td><td>15</td></tr>
</table></td><td>ディーゼル＝ガソリン
大型＝ディーゼル、小型＝ガソリン</td></tr>
<tr><td>1993</td><td>トンネル換気設計指針(案)　［24］</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th>平常時</th><th>渋滞時</th></tr>
<tr><td>7</td><td>7</td></tr>
</table></td><td>車両１台当たり</td></tr>
<tr><td>2008～
2009</td><td>道路トンネル技術基準(換気編)・同解説　［2］
機械設備設計要領(トンネル換気設備編)　［29］
設計要領第３集(2)トンネル換気　［28］</td><td>(単位 l/km)
<table>
<tr><th>平常時</th><th>渋滞時</th></tr>
<tr><td>5</td><td>7</td></tr>
</table></td><td>車両１台当たり</td></tr>
</table>

３）煤煙の設計濃度

煤煙は、視認性を阻害する代表的な物質として換気対象物質に選定されている。視認性に関しては、安全性及び快適性をもとに設計濃度を決めてきている。

(a) 煤煙の濃度

煤煙あるいは煙の中でものの見え方を判断する為には煤煙又は、煙中を通過する光の強度をもとに算定される光学濃度を採用している。

これは、入射光が溶質によって吸収する割合は、溶質の層の厚さに比例するというランベルトの法則と層の厚さに比例するというランベルトの法則と層の厚さが一定であれば、溶質分子の数 n は、溶質の濃度 C に比例するというベールの法則を利用して値を求めるものである。この法則は、ランベルト・ベールの法則と呼ばれ試料溶液の吸光度を測定して試料中の目的の濃度を求める方法に利用されている。

$$\log\frac{I}{I_0}=k\cdot l=\varepsilon\cdot c\cdot l$$

K・l：吸光度

l　：溶質層の厚さ（m）

ε　：吸光係数（1/m）

c　：濃度

これは、濃度既知の標準溶液について吸光度を測定し、吸光係数 ε を求めておくと試料溶液の吸光度を求めることにより濃度を定量できる。道路トンネルの場合、光の強度を測定するが、この光の強度をもとに算定されるのは、吸光度 K・l であり、この K を煤煙濃度と定義する。このため煤煙濃度は、(1/m) の単位をもつことになる。

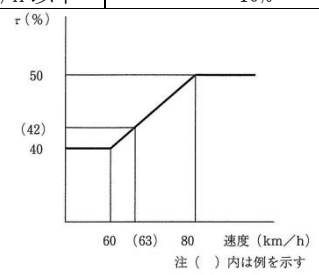
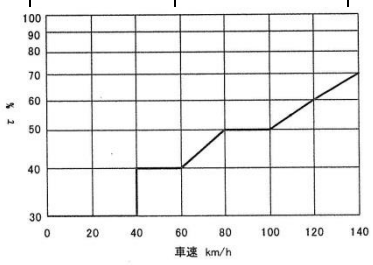
従来、指数－対数の換算を容易にするために 10 を底とする常用対数が用いられていたが、火災時の煙の濃度が自然対数を用いて表現されていることもあり、2001 年（平成 13 年）“道路トンネル技術基準（換気編）・同解説”［25］より自然対数で整理されている。

(b) 設計濃度

関門トンネルが供用し初めて換気の対象物質が CO より煤煙で決まることが分かってきた。名神高速道路の計画にあたっては、煤煙に対し、安全性及び快適性を確保する基本方針が打ち出され照明を含め見え方に対する実験が行われ設計濃度（透過率）70%が提案された。しかし、実際の設計濃度は 50%が採用されている。

当時は、照明光源により見え方が変わるとされ代表的光源のナトリウム灯と蛍光灯で設計値を変えていた。また、都市間高速道路では暫定二車で供用するトンネルが多く、この場合には可能交通容量まで対応できることが考えられるが走行速度が低下するので設計濃度として τ ＝30%まで許容していた。現状では、照明光源による見え方に対する差のないことが認められ光源による差はなくなり、快適性の最小値は τ ＝40%とし安全性については走行速度に対しての設計濃度を決めている。なお、この設計濃度は、走行速度 80km/h の視距（安全停止距離：110m）を考慮し 100m 当たりの値で示される。

表 １３　煤煙の設計濃度の経緯

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>設計濃度</th><th>備考</th></tr>
<tr><td>1950 年代</td><td>関門トンネル</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td>1960</td><td>名神高速道路トンネルの換気量
及びその算定基礎　［16］</td><td>τ＝70%
（設計値 50%）</td><td>安全性、快適性
見え方に関する実験結果をもとに決める(蛍光灯)</td></tr>
<tr><td>1964</td><td>トンネル換気設計要領　［17］</td><td>τ＝30%
τ＝50%</td><td>ナトリウム灯(50lx：路面照度)
蛍光灯(50lx：路面照度)</td></tr>
<tr><td>1969</td><td>トンネル換気設計指針
（日本道路公団）　［18］</td><td>τ＝60%</td><td>ナトリウム灯(60lx：路面照度)
段階施工τ＝30%</td></tr>
<tr><td>1975</td><td>道路トンネル便覧　［19］
（日本道路協会）</td><td>トンネル内の煤煙濃度の設計目標値
<table>
<tr><th>道路種別</th><th>煤煙濃度(100m 透過率)</th></tr>
<tr><td>一種・二種</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>三種・四種</td><td>40%</td></tr>
</table></td><td>照明条件、舗装の種類などによってこの値よりもさらに高くすることが必要な場合もある。</td></tr>
<tr><td>1976</td><td>道路トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路公団）　［21］</td><td>τ＝50%</td><td>設計目標値</td></tr>
<tr><td>1978</td><td>設計要領第３集（2）トンネル換気
（日本道路公団）　［22］</td><td>設計濃度
<table>
<tr><th rowspan="2">計画内容</th><th colspan="2">煤煙に対して(100m 透過率)</th></tr>
<tr><th>ナトリウム灯
路面照度 60lx</th><th>蛍光灯路面
照度 60lx</th></tr>
<tr><td>推定交通量を
用いた場合</td><td>τ＝50%</td><td>τ＝70%</td></tr>
<tr><td>設計交通量を
用いた場合</td><td>τ＝40%</td><td>τ＝60%</td></tr>
<tr><td>段階施行</td><td>τ＝30%</td><td>τ＝50%</td></tr>
</table></td><td></td></tr>
<tr><td>1984</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路公団）　［14］</td><td>τ＝50%</td><td>設計目標値</td></tr>
<tr><td>1985</td><td>道路トンネル技術基準（換気編）・
同解説（日本道路協会）　［23］</td><td>トンネル内の煤煙濃度の設計目標値
<table>
<tr><th>設計速度</th><th>煤煙濃度(100m 透過率)</th></tr>
<tr><td>80 km/h 以上</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>60 km/h 以下</td><td>40%</td></tr>
</table></td><td>走行速度の採用</td></tr>
<tr><td>1993</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路公団）　［24］</td><td>τ＝40%</td><td>可能交通容量を対象</td></tr>
<tr><td>1997</td><td>設計要領第３集（2）トンネル換気
（日本道路公団）　［33］</td><td>道路の設計速度と設計濃度その１
<table>
<tr><th rowspan="2">設計速度</th><th colspan="2">煤煙に対して(100m 透過率)</th></tr>
<tr><th>推計時間交通量時</th><th>設計交通容量時</th></tr>
<tr><td>100 km/h</td><td>τ＝50%</td><td>τ＝49%</td></tr>
<tr><td>80 km/h</td><td>τ＝50%</td><td>τ＝42%</td></tr>
<tr><td>60 km/h</td><td>τ＝40%</td><td>τ＝40%</td></tr>
</table></td><td>走行速度に対応</td></tr>
<tr><td>2001</td><td>道路トンネル技術基準（換気編）・
同解説（日本道路協会）　［25］</td><td>トンネル内の煤煙濃度の設計目標値
<table>
<tr><th>設計速度</th><th>煤煙濃度(100m 透過率)</th></tr>
<tr><td>80 km/h 以上</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>60 km/h 以下</td><td>40%</td></tr>
</table>

</td><td>走行速度に比例する</td></tr>
<tr><td>2003</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路公団）　［26］</td><td>トンネル内の煤煙濃度の設計目標値
<table>
<tr><th>設計速度</th><th>煤煙濃度(100m 透過率)</th></tr>
<tr><td>80 km/h 以上</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>60 km/h 以下</td><td>40%</td></tr>
</table></td><td></td></tr>
<tr><td>2006</td><td>設計要領第３集（2）トンネル換気
［27］</td><td>設計速度と設計濃度
<table>
<tr><th>設計速度
(km/h)</th><th>設計濃度 τ
(%)</th></tr>
<tr><td>60</td><td>40</td></tr>
<tr><td>80～100</td><td>50</td></tr>
<tr><td>120</td><td>60</td></tr>
<tr><td>140</td><td>70</td></tr>
</table>

</td><td>新東名、名神に対応</td></tr>
<tr><td>2008</td><td>道路トンネル技術基準（換気編）・
同解説（日本道路協会）　［2］</td><td>トンネル内の煤煙濃度の設計目標値
<table>
<tr><th>設計速度</th><th>煤煙濃度(100m 透過率)</th></tr>
<tr><td>80 km/h 以上</td><td>50%</td></tr>
<tr><td>60 km/h 以下</td><td>40%</td></tr>
</table></td><td>中間は、走行速度に比例</td></tr>
<tr><td>2009</td><td>設計要領第３集（2）トンネル換気
［28］</td><td>2006 年に同じ</td><td></td></tr>
<tr><td>2014</td><td>機械設備設計要領（トンネル換気
設備編）（首都高速道路㈱）　［29］</td><td>2003 年に同じ</td><td></td></tr>
</table>

４）煤煙の排出量

煤煙の排出量は 1959 年に、トラック 5 台（ディーゼル車 4 台、ガソリン車 1 台）、バス（ディーゼル車）、乗用車 1 台（ガソリン車）をハートリッジスモークメータで測定した。そのデータをもとに縦断勾配を含めた煤煙濃度（光学濃度）を求めている[32]。煤煙の排出量は、この濃度と保有台数から求めた平均排気量の積で算出する。

その後、昭和 48 年（1973 年）に排出ガス規制が行われたが、煤煙は濃度の規制であったために交通量、透過率、車道内風量を求めたトンネル実態調査から算出した排出量に殆ど変化はなかった。1990 年代になり、換気機の維持動力費が減少してきていることから再度実態調査が行われ、煤煙の排出量が減少してきていることが認められた。これは、日本各地で生じた大気汚染公害訴訟で、浮遊粒子状物質の健康への被害が認められエンジンの改良が進められたことによるものである。

表 １４　主な大気汚染訴訟

訴訟名	提訴	被告	最終
西淀川（1 次）	昭和 53 年	国・阪神高速公団 企業 10 社	平成 7 年 5 月 和解
西淀川（2～4 次）	昭和 59～平成 4 年	同上	同上
川崎（1 次）	昭和 57 年	国・首都高速道路公団 企業 13 社	平成 8 年 12 月 和解
川崎（2～4 次）	昭和 58～60 年	同上	同上
尼崎	昭和 63 年	国・阪神高速公団 企業 9 社	平成 25 年 6 月 和解

国交省の資料によれば粒子状の物質の削減量（質量）は、概略図 11 のとおりである。トンネル換気は、光学濃度を対象にしており、トンネル内には排気管以外の浮遊粉じんもある。そこで、光学濃度、質量濃度、粒径分布、成分分析等の実態調査を行い、粒径分布から排気管由来分を抽出、光学濃度と質量濃度との関係を求め排気管由来分を規制値にあてはめ規制効果を求め、設計値を算出している。最近のトンネル内の設計値と実態値は、ほぼ合致することが認められている。これまでの煤煙排出量の経緯を表 16～19 に示す。

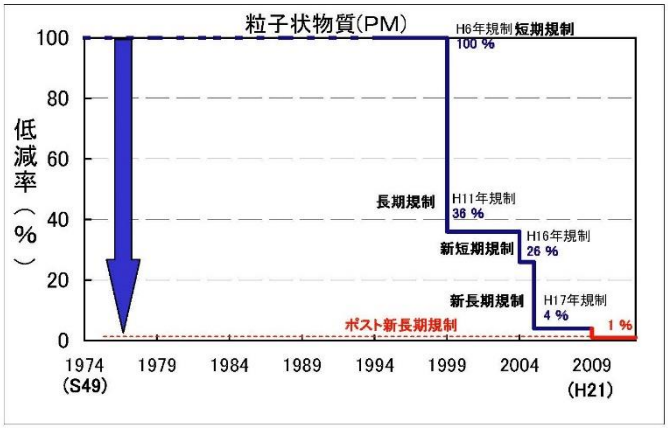


図 １１　自動車排出ガス規制の経緯（国土交通省資料）

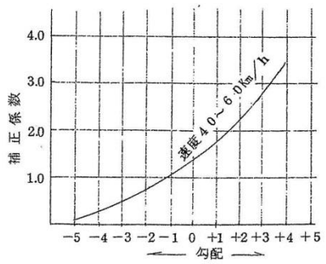
現状での煤煙の排出量（光学濃度基準）をまとめると次のようになる。

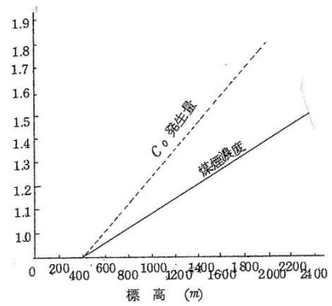
表 １５　現状で採用されている煤煙の排出量

	都市間高速道路トンネル			都市内及び一般道路トンネル		
	平均値 (m^2/km)	標準偏差 (m^2/km)	微粒子率 (%)	平均値 (m^2/km)	標準偏差 (m^2/km)	微粒子率 (%)
小型車	0.3	0.2	75	0.3	0.3	55
大型車	1.0	0.5	70	1.5	0.5	50

表 15 の値が異なるのは、それぞれの機関のトンネルの実態調査から求めた値を採用していることによるものである。また、微粒子率は、トンネル実態調査において排気管由来の割合を示しており都市間高速道路トンネルの割合が都市及び一般道路トンネルより高い。これは、都市間高速道路トンネルの方が路面清掃等で巻き上げの分が少ないことを示している。ただし、微粒子の方が透過率に与える影響が高いので排出量の平均値、及び標準偏差が同じならば微粒子率の高い方が新鮮空気を多く必要とする。また、排出ガスの規制値は厳しく 2005 年以降は 1990 年代の数%の値となるが、トンネルの場合巻き上げ粉じん等を含むので必要となる新鮮空気量は、1990 年代の 20～30%にとどまっている。

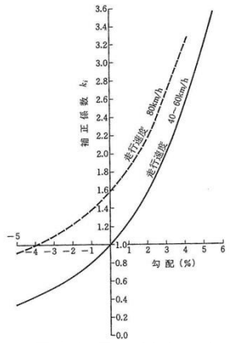
表 １６　煤煙排出量その１

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>排出量</th><th>備　考</th></tr>
<tr><td>1950 年代</td><td>関門トンネル</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td>1960</td><td>トンネル換気設計要領
（日本道路公団）　［16］</td><td>各種自動車排気量(l/km)
<table>
<tr><th colspan="2">車種</th><th>排気量(l/km)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">乗用車</td><td>普通</td><td>3,400</td></tr>
<tr><td>小型</td><td>1,500</td></tr>
<tr><td rowspan="3">トラック</td><td>大型ガソリン</td><td>4,500</td></tr>
<tr><td>大型ディーゼル</td><td>7,700</td></tr>
<tr><td>小型ガソリン</td><td>1,500</td></tr>
<tr><td rowspan="2">バス</td><td>ディーゼル車</td><td>6,500</td></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>6,500</td></tr>
</table>
勾配別煤煙濃度の平均値と標準偏差
<table>
<tr><th>車種</th><th>上り勾配</th><th>平地</th><th>下り勾配</th></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>m　0.125
σ　0.097</td><td>0.046
0.025</td><td>0.066
0.063</td></tr>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>m　0.633
σ　0.543</td><td>0.593
0.504</td><td>0.499
0.436</td></tr>
</table></td><td>湘南横浜バイパス戸塚道路排気管からの測定データ
排出量＝煤煙濃度×排気量</td></tr>
<tr><td>1964</td><td>トンネル換気設計要領
（日本道路公団）　［17］</td><td>勾配別煤煙濃度の平均値と標準偏差
<table>
<tr><th>車種</th><th>上り勾配(+3.0～+0.5%)</th><th>平地(+0.5～-0.5%)</th><th>下り勾配(-0.5～-3.0%)</th></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>m　0.63
σ　0.54</td><td>0.59
0.50</td><td>0.50
0.44</td></tr>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>m　0.13
σ　0.10</td><td>0.05
0.03</td><td>0.07
0.06</td></tr>
</table>
各種自動車排気量
<table>
<tr><th colspan="2">車種</th><th>排気量(m^2/km)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">乗用車</td><td>普通</td><td>2.7</td></tr>
<tr><td>小型</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td rowspan="3">トラック</td><td>大型ガソリン</td><td>2.7</td></tr>
<tr><td>大型ディーゼル</td><td>4.8</td></tr>
<tr><td>小型ガソリン</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>バス</td><td>ディーゼル車</td><td>5.5</td></tr>
</table></td><td>煤煙濃度は利用
排気量の見直し</td></tr>
<tr><td>1969</td><td>トンネル換気設計指針
（日本道路公団）　［18］</td><td>煤煙濃度の基本値
<table>
<tr><th></th><th>平均値μ^1</th><th>標準偏差σ^1</th></tr>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>0.59</td><td>0.50</td></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>0.05</td><td>0.03</td></tr>
</table>
平均ガス量
<table>
<tr><td>ディーゼル車</td><td>5.6m^3/km</td></tr>
<tr><td>ガソリン車</td><td>1.3m^3/km</td></tr>
</table>


煤煙換気量に対する補正係数


標高補正係数</td><td>・煤煙濃度データはそのまま採用
・平均排気ガス量は、昭和 34 年～41 年まで総生産台数（自動車頭系日報）及び昭和 43 年 10 月現在の自動車保有台数及び国産自動車諸元表より算出した代表的車種の平均排気量の加重平均値
・縦断勾配による補正係数の採用
・勾配補正は昭和 40、41 年に名神高速道路で行ったディーゼル車煤煙濃度の実地走行試験結果によるもので走行速度を考慮している。
・標高補正は、スイスレポートを採用（日本での調査データ少ない）</td></tr>
</table>

表 １７　煤煙排出量その２

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>排出量</th><th>備　考</th></tr>
<tr><td>1975</td><td>道路トンネル便覧
（日本道路協会）　［20］</td><td>煤煙濃度の基本値
<table><tr><th></th><th>平均値μ[1]</th><th>標準偏差σ[1]</th></tr><tr><td>ディーゼル車</td><td>0.6</td><td>0.5</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr></table>平均ガス量
<table><tr><td>ディーゼル車</td><td>5.6m³/km</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>1.3m³/km</td></tr></table>勾配及び標高補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず</td><td>・煤煙濃度：数字をまるめている
・平均排気ガス量 1969 年と同じ</td></tr>
<tr><td>1976</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路協会）　［21］</td><td>煤煙濃度の基本値
<table><tr><th></th><th>平均値μ[1]</th><th>標準偏差σ[1]</th><th>排出ガス量 V(m³/km)</th></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>0.59</td><td>0.5</td><td>5.6</td></tr><tr><td>ディーゼル車</td><td>0.05</td><td>0.03</td><td>1.3</td></tr></table>勾配及び標高補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず</td><td>1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）の値と変わらず</td></tr>
<tr><td>1978</td><td>設計要領第 3 集（2）トンネル換気（日本道路公団）　［22］</td><td>煤煙濃度の基本値
<table><tr><th></th><th>平均値μ[1]</th><th>標準偏差σ[1]</th></tr><tr><td>ディーゼル車</td><td>0.59</td><td>0.50</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>0.05</td><td>0.03</td></tr></table>平均ガス量
<table><tr><th>車種別</th><th>機関別</th><th>比率</th><th>平均排気量</th></tr><tr><td rowspan="2">大型車</td><td>ディーゼル車</td><td>76%</td><td>5.7</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>24%</td><td>2.4</td></tr><tr><td rowspan="2">小型車</td><td>ディーゼル車</td><td>2%</td><td>2.5</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>98%</td><td>1.2</td></tr></table></td><td>・煤煙濃度、勾配及び標高補正そのまま
・排気ガス量は昭和 43 年～48 年の総台数と自動車諸元表より代表車種の平均排気量から算出</td></tr>
<tr><td>1984</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路協会）　［14］</td><td>煤煙濃度の基本値
<table><tr><th></th><th>平均値μ[1]</th><th>標準偏差σ[1]</th><th>排出ガス量 V(m³/km)</th></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>0.05</td><td>0.0</td><td>1.3</td></tr><tr><td>ディーゼル車</td><td>0.6</td><td>0.5</td><td>5.6</td></tr></table>勾配及び標高補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず</td><td>勾配及び標高補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず</td></tr>
<tr><td>1985</td><td>道路トンネル技術基準
（換気編）・同解説
（日本道路協会）　［23］</td><td>従来の換気設計に用いられた有害成分の排出量
<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>備考</th></tr><tr><td>ディーゼル車</td><td>0.6※</td><td>0.5※</td><td>平均排気ガス量を 5.6m³/km とすると排出量の平均 μ_D は μ_D=0.6×5.6=3.36m²/km/台</td></tr><tr><td>ガソリン車</td><td>0.1※</td><td>0</td><td>平均排気ガス量を 1.3m³/km とすると排出量の平均 μ_D は μ_D=0.1×1.3=0.13m²/km/台</td></tr></table>※煤煙濃度：1m 当りの吸光係数（1/m）
 

煤煙換気量に対する勾配及び走行速度補正 Ki</td><td>勾配及び標高補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず。勾配補正に走行速度 80 km/h を追加（データは 1969 トンネル換気設計指針と同じ）</td></tr>
</table>

表 １８　煤煙排出量その３

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>排出量</th><th>備　考</th></tr>
<tr><td>1993</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路協会）　［24］</td><td>煤煙発生量(m²/(km・veh))
<table><tr><th></th><th>平均値μ¹</th><th>標準偏差σ¹</th></tr><tr><td>大型車</td><td>2.1</td><td>1.0</td></tr><tr><td>小型車</td><td>0.16</td><td>0.30</td></tr></table>［トンネル実測調査より(恵那山上り線)］
勾配補正 40 km/h 追加、標高補正変わらず</td><td>・トンネル実態調査の結果を反映（千代田 TN、宇津之谷 TN でも行われてきているが、恵那山の結果が一番大きい）
・勾配補正は 1969 年トンネル換気設計指針（日本道路公団）変わらず</td></tr>
<tr><td>1997</td><td>設計要領第 3 集 (2) トンネル換気（日本道路公団）　［33］</td><td>煤煙 1 台当りの排出量
<table><tr><th></th><th>平均値μ¹</th><th>標準偏差σ¹</th><th>備考</th></tr><tr><td>大型車</td><td>5.1</td><td>2.3</td><td>自然対数表示(煤煙濃度)</td></tr><tr><td>小型車</td><td>0.5</td><td>0.7</td><td></td></tr></table>勾配補正、標高補正変わらず</td><td>・道路トンネル技術基準（換気編）・同解説 2001 年を先取り
・トンネル実態調査（平成 3～5 年）
換気設計に用いる煤煙の自動車 1 台当りの発生源単位と補正係数
土木技術資料 Vo136.1994.9</td></tr>
<tr><td>2001</td><td>道路トンネル技術基準（換気編）・同解説
（日本道路協会）　［25］</td><td>換気量計算に用いる煤煙の排出量
<table><tr><th></th><th>平均値μ¹</th><th>標準偏差σ¹</th></tr><tr><td>小型車</td><td>0.5m²/(km・台)</td><td>0.7m²/(km・台)</td></tr><tr><td>大型車</td><td>5.1m²/(km・台)</td><td>2.3m²/(km・台)</td></tr></table>注)吸光係数の算出式が従来の常用対数から自然対数に変更されたための数値に loge10＝2.303 を乗じて変換した。勾配補正、標高補正変わらず</td><td>・実態調査より求める（土木技術資料 Vo136.1994.9）</td></tr>
<tr><td>2003</td><td>トンネル換気設計指針（案）
（首都高速道路協会）　［26］</td><td>換気設計に用いる煤煙排出量
（単位：m²/km・台）
<table><tr><th rowspan="2">年度</th><th colspan="3">小型車</th><th colspan="3">大型車</th></tr><tr><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>微粒子率</th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>微粒子率</th></tr><tr><td>平成 14 年度</td><td>1.0</td><td>1.5</td><td>25.4%</td><td>3.6</td><td>1.8</td><td>48.6%</td></tr><tr><td>平成 15 年度</td><td>1.0</td><td>1.4</td><td>22.9%</td><td>3.3</td><td>1.6</td><td>44.7%</td></tr><tr><td>平成 16 年度</td><td>1.0</td><td>1.4</td><td>20.7%</td><td>3.1</td><td>1.5</td><td>41.0%</td></tr><tr><td>平成 17 年度</td><td>0.9</td><td>1.4</td><td>18.1%</td><td>2.9</td><td>1.4</td><td>36.4%</td></tr><tr><td>平成 18 年度</td><td>0.9</td><td>1.3</td><td>16.0%</td><td>2.7</td><td>1.3</td><td>32.1%</td></tr><tr><td>平成 19 年度</td><td>0.9</td><td>1.3</td><td>14.3%</td><td>2.6</td><td>1.3</td><td>28.6%</td></tr><tr><td>平成 20 年度</td><td>0.9</td><td>1.3</td><td>12.8%</td><td>2.5</td><td>1.2</td><td>25.6%</td></tr><tr><td>平成 21 年度</td><td>0.9</td><td>1.3</td><td>11.7%</td><td>2.4</td><td>1.2</td><td>23.5%</td></tr><tr><td>平成 22 年度</td><td>0.9</td><td>1.2</td><td>10.9%</td><td>2.4</td><td>1.1</td><td>21.7%</td></tr><tr><td>平成 23 年度</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>10.2%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>20.3%</td></tr><tr><td>平成 24 年度</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>9.7%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>19.2%</td></tr><tr><td>平成 25 年度</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>9.4%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>18.6%</td></tr><tr><td>平成 26 年度</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>9.2%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>18.2%</td></tr><tr><td>平成 27 年度</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>9.1%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>18.0%</td></tr><tr><td>平成 28 年度以降</td><td>0.8</td><td>1.2</td><td>9.0%</td><td>2.3</td><td>1.1</td><td>18.0%</td></tr></table>（中央環境審議会 4 次答申を考慮：縦断勾配 0%、標高 400 以下、走行速度 80km/h の値を示す。）</td><td>・SPM の排出規制が強化されその効果も表れてきているため規制値を取り込んだ排出量を算定した。
・勾配補正は、台上試験結果を採用</td></tr>
<tr><td>2006</td><td>設計要領第 3 集 (2)
トンネル換気　［27］</td><td>2003 トンネル換気設計指針（案）（首都高速道路公団）に同じ</td><td></td></tr>
</table>

表 １９　煤煙排出量その４

<table>
<tr><th></th><th>対象又は基準</th><th>排出量</th><th>備　考</th></tr>
<tr>
<td>2008</td>
<td>道路トンネル技術基準（換気編）・同解説
（日本道路協会）　［2］</td>
<td>
煤煙の１台当りの排出量(平成 25 年以降対象)
<table>
<tr><th></th><th>平均値(m²/km)</th><th>標準偏差(m²/km)</th><th>微粒子率(%)</th></tr>
<tr><td>小型車</td><td>0.3</td><td>0.3</td><td>55</td></tr>
<tr><td>大型車</td><td>1.5</td><td>0.5</td><td>50</td></tr>
</table>
速度勾配補正係数（煤煙対象）(K_S、K_L)【平成 25 年度以降対象】
<table>
<tr><th rowspan="2">勾　配</th><th>大型車･小型車</th><th rowspan="2">勾　配</th><th>大型車・小型車</th></tr>
<tr><th>40～80km/h</th><th>40～80km/h</th></tr>
<tr><td>0.0</td><td>1.00</td><td>0.0</td><td>1.00</td></tr>
<tr><td>-0.5</td><td>0.91</td><td>0.5</td><td>1.10</td></tr>
<tr><td>-1.0</td><td>0.81</td><td>1.0</td><td>1.19</td></tr>
<tr><td>-1.5</td><td>0.72</td><td>1.5</td><td>1.29</td></tr>
<tr><td>-2.0</td><td>0.62</td><td>2.0</td><td>1.38</td></tr>
<tr><td>-2.5</td><td>0.53</td><td>2.5</td><td>1.48</td></tr>
<tr><td>-3.0</td><td>0.44</td><td>3.0</td><td>1.58</td></tr>
<tr><td>-3.5</td><td>0.34</td><td>3.5</td><td>1.67</td></tr>
<tr><td>-4.0</td><td>0.25</td><td>4.0</td><td>1.77</td></tr>
</table>
</td>
<td>・実態調査
・中央環状審議会 4 次答申を考慮（縦断勾配 0%、標高 400m 以下、走行速度 60 km/h）</td>
</tr>
<tr>
<td>2009</td>
<td>設計要領第 3 集
（2）トンネル換気　［28］</td>
<td>
煤煙の１台当りの排出量の予測値（単位：m²/km･台）
<table>
<tr><th rowspan="2">年度</th><th colspan="3">小型車</th><th colspan="3">大型車</th></tr>
<tr><th>平均値
μ_S</th><th>標準偏差
σ_S</th><th>微粒子率
R_S</th><th>平均値
μ_L</th><th>標準偏差
σ_L</th><th>微粒子率
R_L</th></tr>
<tr><td>平成 21 年度</td><td>0.4</td><td>0.2</td><td>80%</td><td>1.3</td><td>0.6</td><td>80%</td></tr>
<tr><td>平成 22 年度</td><td>0.4</td><td>0.2</td><td>80%</td><td>1.2</td><td>0.6</td><td>80%</td></tr>
<tr><td>平成 23 年度</td><td>0.3</td><td>0.2</td><td>80%</td><td>1.1</td><td>0.5</td><td>75%</td></tr>
<tr><td>平成 24 年度</td><td>0.3</td><td>0.2</td><td>80%</td><td>1.1</td><td>0.5</td><td>75%</td></tr>
<tr><td>平成 25 年度</td><td>0.3</td><td>0.2</td><td>80%</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>75%</td></tr>
<tr><td>平成 26 年度以降</td><td>0.3</td><td>0.2</td><td>75%</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>70%</td></tr>
</table>
注）煤煙の排出量は、1 台の車両が単位距離（km）を走行した場合の煤煙排出量であり、煤煙濃度に排気量を乗じることにより求められ、単位は m²/(km・台)（＝(1/m)・(m³/(km・台))である。

速度勾配補正係数（煤煙対象）(K_S、K_L)【平成 25 年度以降対象】
<table>
<tr><th rowspan="2">勾　配</th><th>大型車･小型車</th><th rowspan="2">勾　配</th><th>大型車・小型車</th></tr>
<tr><th>40～80km/h</th><th>40～80km/h</th></tr>
<tr><td>0.0</td><td>1.00</td><td>0.0</td><td>1.00</td></tr>
<tr><td>-0.5</td><td>0.90</td><td>0.5</td><td>1.11</td></tr>
<tr><td>-1.0</td><td>0.80</td><td>1.0</td><td>1.21</td></tr>
<tr><td>-1.5</td><td>0.71</td><td>1.5</td><td>1.31</td></tr>
<tr><td>-2.0</td><td>0.61</td><td>2.0</td><td>1.41</td></tr>
<tr><td>-2.5</td><td>0.52</td><td>2.5</td><td>1.51</td></tr>
<tr><td>-3.0</td><td>0.44</td><td>3.0</td><td>1.59</td></tr>
<tr><td>-3.5</td><td>0.36</td><td>3.5</td><td>1.67</td></tr>
<tr><td>-4.0</td><td>0.27</td><td>4.0</td><td>1.74</td></tr>
</table>
</td>
<td>・解析データ追加、数値の見直し
・速度勾配補正：若干異なる。走行速度 140 km/h まで対応</td>
</tr>
<tr>
<td>2014</td>
<td>機械設備設計要領［トンネル換気編］（首都高速道路㈱）［29］</td>
<td>2008 年道路トンネル技術基準（換気編）・同解説と同じ</td>
<td></td>
</tr>
</table>

４－２　長大トンネルの縦流換気方式

長大トンネル縦流換気方式の代表として関越トンネルがある。この関越トンネルを題材として横流、半横式との違いを示す。

（１）関越トンネルの計画

関越トンネルは、トンネル延長 11 ㎞で立坑送排気付縦流換気方式を採用している。段階建設をしており Ⅰ期線は 1985 年、Ⅱ期線は 1991 年に供用されている。上り線(Ⅱ期線)は、送排気装置 2 ヶ所、集塵室 4 ヶ所の計画である。各換気装置の配置と計画交通時の車道内の濃度は図 12 に示すとおりである。

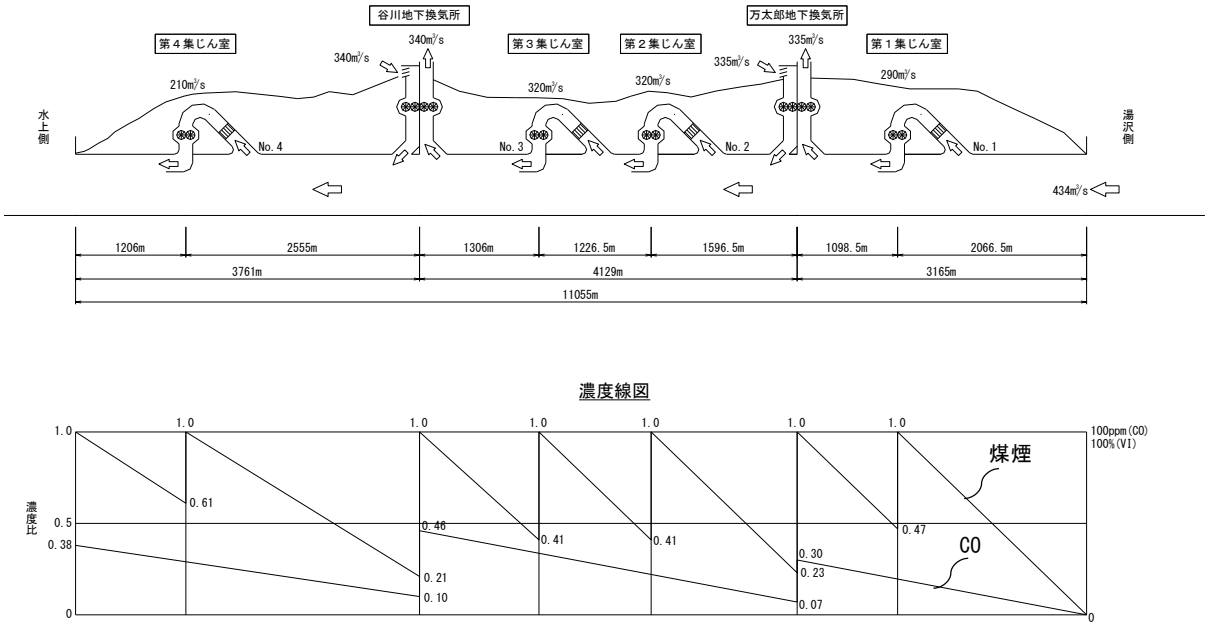


図　１２　関越トンネル換気概要図

図１２の濃度線図に示すとおり、各換気施設は濃度が最大となる位置に設置することが効率の良い計画となる。このように縦流換気方式は、車道を流れる空気の量に支配される。この方式の場合、車道を流れる流量は交通換気力と送排気装置及び集塵機のノズルの昇圧力により決まる。従って、計画が進む中、送排気装置及び集塵機の送気ノズルによる昇圧力の実験や交通換気力に影響する車両の抵抗係数に関する調査や実験が行われた。

電気集塵機は、煤煙の換気量と CO 換気量の差を利用したもので、長大トンネルの場合、トンネルの中間で空気の入替が必要となるが、その入替用の換気抗（立、斜坑）の代わりにバイパス式の電気集塵室を設け、トンネル内の空気を分流集塵し、トンネル内に戻し再利用するものである。従って集塵室は、CO の濃度を上回らない範囲で設置することになる。

一方、横流式や送気半横流式の場合、立斜坑等換気坑位置は、天井部に設置されるダクトに接続されることから接続位置に余裕度があり車道への対応は、天井部の排気スロットや送気フリューの開度を調整することで対応できる。

（２）電気集塵機

電気集塵機は、東名道路高速トンネルの出口坑口部周辺の農作物の汚れ対策から始まった。当初、浮遊粉塵の除去のためにろ過式、遠心式等の種々の方式に対する実験の結果、浮遊粉塵の特徴や処理装置として要求される条件に適用する電気集塵式が採用されトンネル用として改善されることにより現在に至っている。トンネル換気用として具備すべき条件は、次の通りである。

① 濃度が低く粒径が、１μ以下がほとんどである。

② 処理風量が多いので機器を小型化するために処理風速を高くする必要がある。

③ 集塵部の消費電力、圧損が少なくする必要がある。

④ ２次的公害物質の発生が無いこと。

このような要求に対し試験機が開発され実験が行われ実用機の誕生に至った。その実用機が敦賀トンネルⅡ期線で試験施工され運用上の良好な結果を得た。そこで関越トンネルに本格的に採用し実用上問題ないことが確認され、その後の都市間長大トンネルの中心的な方式となる。その時の集塵機は、ユニット化され集塵処理風速 7m/ｓ、集塵効率 80%以上となっている。集塵機の形状を図 13 に示す。

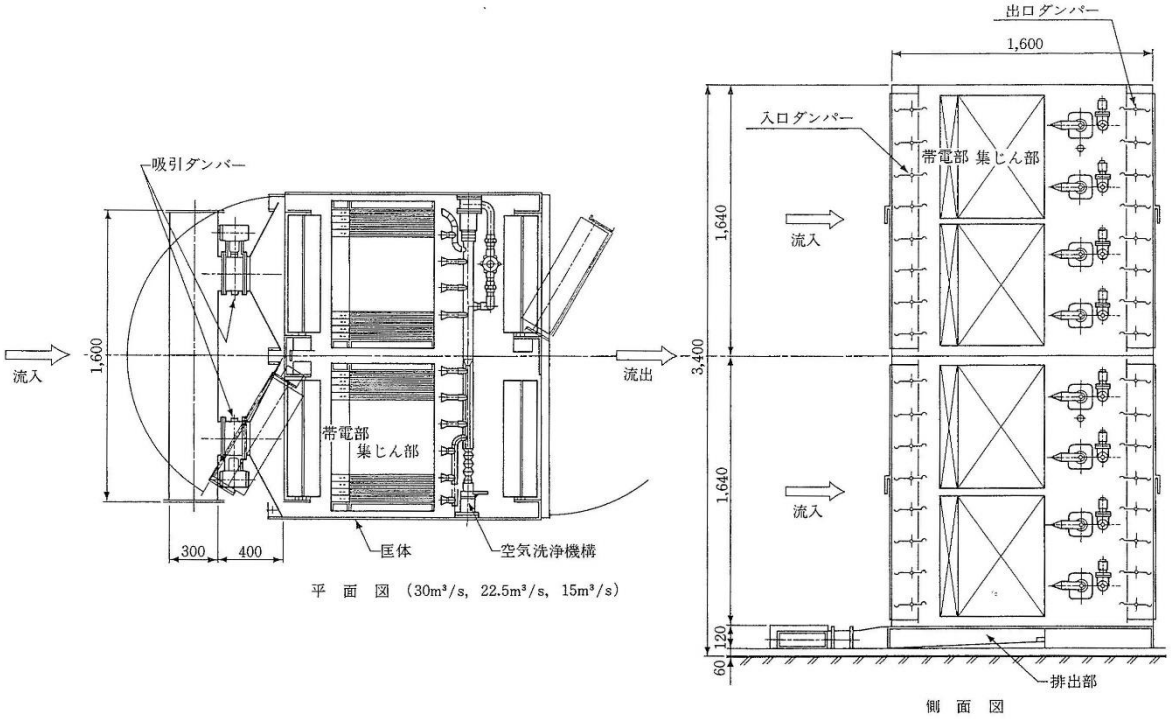


図 １３　電気集塵機 15㎥ユニット姿図（参考）[23]

この電気集塵機は、二段式と呼ばれ集塵部が帯電部と集塵部に分かれ、帯電部には DC11KV 程度の電圧を印加し帯電させ集塵部に DC8KV 程度の電圧をかけ静電気力で付着させている。

現在、集塵機は環境対策用としても利用されており処理風速 11m/s のものも開発されている。なお集塵効率は、質量濃度で示されるが実験結果［34］から質量濃度と透過率の改善が 1：1 の関係にあることが認められ、質量濃度で評価されている。

集塵室の一例を図 14 に示す。延長は、120m 程度で集塵室には集塵ユニットの他、ファン、高圧発生盤、洗浄装置等が設置される。

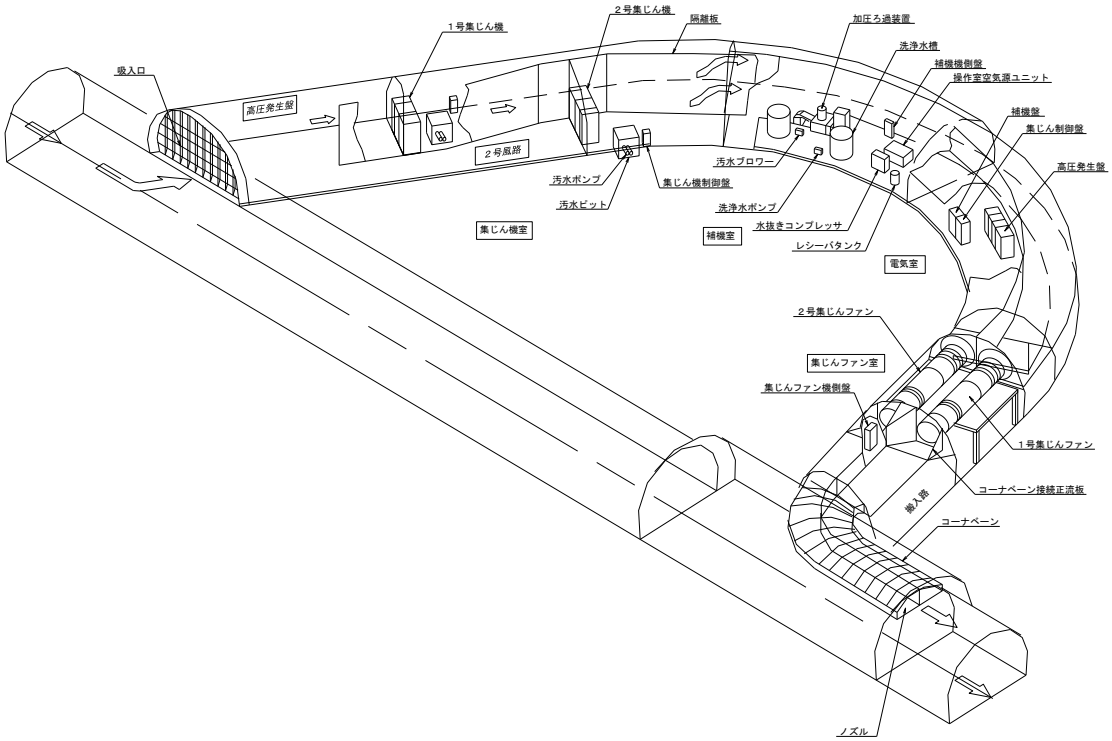


図 １４　電気集塵室の一例

前記したように電気集塵機は、送排気装置を省略できるが都市トンネルの場合、地上までの距離が短いこと、集塵機を利用することにより換気所設置場所ごとの外部への排出量が大きく変わり周辺環境に与える影響に差が出ること等があり、換気用として利用されることがなかった。

（２）都市内高速道路長大トンネルへの縦流換気方式の採用

都市内高速道路トンネルの特徴は、重交通及びトンネル内の分合流部の存在があげられる。縦流換気方式は、交通換気力を有効に利用することにより経済的な換気方式となる。従って渋滞の発生する都市内トンネルでは、交通換気力により十分な流量を確保することが出来ず横流換気方式とは異なり補助装置（ジェットファン）が必要となる。ただ、大深度化が進むことによりシールド工法が採用され内空断面が大きくなり縦流式が採用しやすくなったが、分岐合流部の交通流と空気の流れを把握するのに実験や実態調査に時間を要した。この他、1990 年代後半のヨーロッパの長大トンネルの火災と被害状況は、重交通である都市トンネルにおいても身近な課題であり、横流式トンネルで風速のコントロールと避難施設である避難口との関係を三次元火災シミュレーションと対応させ安全に避難できる避難口間隔を決める手法が確立された。この手法を縦流式に採用し縦流風をコントロールする、すなわち煙をコントロールすることにより避難口間隔は横流式より短くなるものの避難環境を確保できることが確認出来た。このため、走行環境を保全する以外の目的のために数多くのジェットファンを設置する必要が生じた。この風速コントロール用のジェットファンは、渋滞用にも利用可能となり、時間は掛かったが都市内の長大トンネルに縦流換気方式が採用されるに到った。

４－３　ジェットファンの技術的進歩

ジェットファンは、可逆運転が可能な小型の軸流送風機であり、トンネル車道部に設置し、その噴流効果により坑口より新鮮空気を流入し換気を行う換気機である。このほかの役割としては、集中排気式の圧力調整、火災時の風速コントロール用、火災時の消火・救急支援用等に利用する。このジェットファンは、1966 年に海外から輸入品を 1 号機として設置し、そのあと国産品が製造されるようになり、効率、口径、吹出し風速等に改良が加えられていった。

表 ２０　ジェットファンの開発と最初に設置されたトンネル

年	トンネル名	口径	吹出し風速 (m/s)	出力(Kw)	吹出し方向	備考
1966	奥田	630	30	11	両方向	Voit 社製
1975	福島	1030	30	25	両方向	効率 60%
1980	谷稲葉	1530	30	55	両方向	効率 65%
1983	米山	1530	30	50	片方向	効率 70%
1987	花立	1250	30	37	両方向	効率 67%
				30	片方向	効率 75%
2002	新日本坂	1030	35	33	両方向	効率 75%
2003	愛別	1250	35	50	両方向	効率 75%
2004	才谷	630	35	10.9	両方向	効率 70%

注）両方向吹出し：ジェットファン（JF）　片方向吹出し：ブースターファン（BF）

開発経緯は、以下のとおりである。

①口径 630 の開発　　：海外の機器を参考に国産用を開発

②口径 1030 の開発　　：トンネル断面にあわせ能力の大きいものの開発

③口径 1530 の開発　　：関越トンネル用として断面にあわせ全台数を少なくするために能力の大きいものを開発

④口径 1530BF の開発　　：吹出し方向を片側に限定し機械効率をあげる。

⑤口径 1250 の開発　　：オイルショック以降の経済性追求による標準断面の縮小をそれにあわせた口径の開発。

⑥口径 1250BF の開発　　：口径 1530 と同じ

⑦吹き出し風速 35m/s の開発　　：設備台数を少なくするために吹出し風速を 30m/s から 35m/s に上昇させている。

現在では、ジェットファンの効率がブースターファンと変わらなくなり、ブースターファンは製作されなくなった。また設備規模を少なくするために吹出し風速 35m/ s のジェットファンが利用される方向にある。トンネル断面積 60m^2、車道内風速 3m/s のときのそれぞれ 1 台当たりの昇圧力を表 21 に示す。この結果から口径が 1000 及び 1250 の高風速吹出しは、1 ランク大きな口径に相当することがわかる。

表 ２１　ジェットファン昇圧力

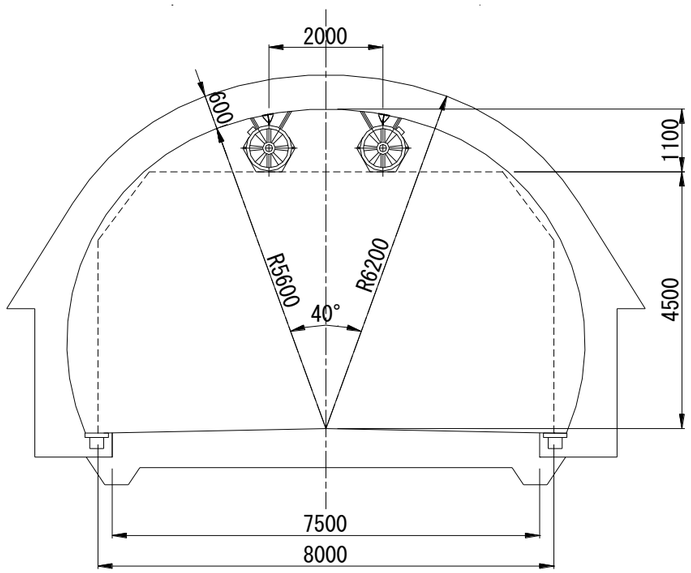
口径	吹出し風速 Uj(m/s)	吹出し面積 Ar(m^2)	昇圧力 P_j (Pa)	備考
φ630	30	0.31	5.0	トンネル断面積
φ1000	30	0.83	13.4	Ar＝60m^2
φ1250	30	1.23	19.9	トンネル内風速
φ1500	30	1.84	29.8	Ur＝3m/s
φ630	35	0.31	6.9	ΔPj＝ρ/2U^{2}j×2(Aj/Ar)
φ1000	35	0.83	18.6	×(1－Ur/Uj)
φ1250	35	1.23	27.6	

これまでのジェットファン及びブースターファンの仕様を表 22 に示す。

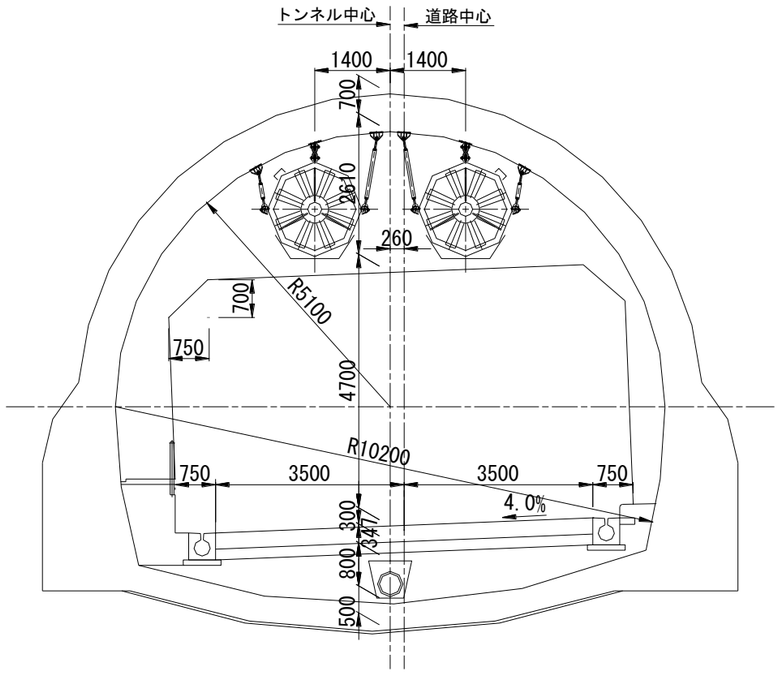
表 ２２　日本のジェットファン及びブースターファンの仕様

種類			ジェットファン		ジェットファン		ジェットファン			ブースターファン	ジェットファン	ブースターファン	ジェットファン				ブースターファン		ジェットファン					
型式			600型	600型	600型	1000型	600型	1000型	1500型	1500型	1250型	1250型	600型	1000型	1250型	1500型	1250型	1500型	600型		1000型		1250型	
送風機	口径	(mm)	630	630	630	1030	630	1030	1530	1530	1250	1250	630	1030	1250	1530	1250	1530	630	630	1030	1030	1250	1250
	吹出平均風速	(m/s以上)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35	30	35	30	35
	効率	(%以上)	(60)	60	60	60	60	60	65	70	67	75	60	65	75	70	75	70	60	60/70	65	75	75	75
	騒音	(dB(A)以下)	85	90	90	95	90	95	98	93	95	95	80	95	95	95	95	95	80/90	90/95	95	95	95	95
	全長	(mm)	4700	3000	3000	4900	3000	4900	5500	4250	5200	4250	3000	4250	4250	4250	4250	4250	3000	3000	4250	4250	4250	4250
	外径	(mm)	800	800	800	1200	800	1200	1750	1750	1450	1450	800	1200	1450	1750	1450	1750	800	800	1200	1200	1450	1450
	(吐出風量)	(m^3/s以上)	8.16	8	8	25	8	25	55	55	36.8	36.8	8	25	37	55	37	55	8/9.2	9.5/10.9	25	29	37	49
	(有効吐出面積)	(m^2)	(0.27)	0.27	0.27	0.83	0.27	0.83	1.84	1.84	1.23	1.23	0.27	0.83	1.23	1.84	1.23	1.84	0.27/0.31	0.27/0.31	0.83	0.83	1.23	1.23
	吹出方向		両方向	両方向	両方向	両方向	両方向	両方向	両方向	片方向	両方向	片方向	両方向	両方向	両方向	両方向	片方向	片方向	両方向	両方向	両方向	両方向	両方向	両方向
電動機	電圧	(V)	440	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400	440/400
	出力	(kw以下)	11	11	11	30	11	30	55	50	37	30	11	25	30	50	30	50	11/11	12.5/15	25	33	30	50
	定格種別		(連続)	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続	連続
	絶縁種別	(以上)	−	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種	F種
概算重量		(kg)	650	650	600	1300	600	1200	2700	2100	2100	1900	500	1100	1650	2300	1600	2300	500	700	1100	1300	1650	2000
備考			Voit 社 製(ドイツ)	国産品の開発																				
			600型及び1000型の開発(吐出風速30m/s)				1500型の開発(ブースターファン含)				JF1250の開発(ジェットファン、ブースターファン)		高効率の開発(1000型、1250型、1500型)						高風速型(吐出風速35m/s)の開発(600型、1000型、1250型)					

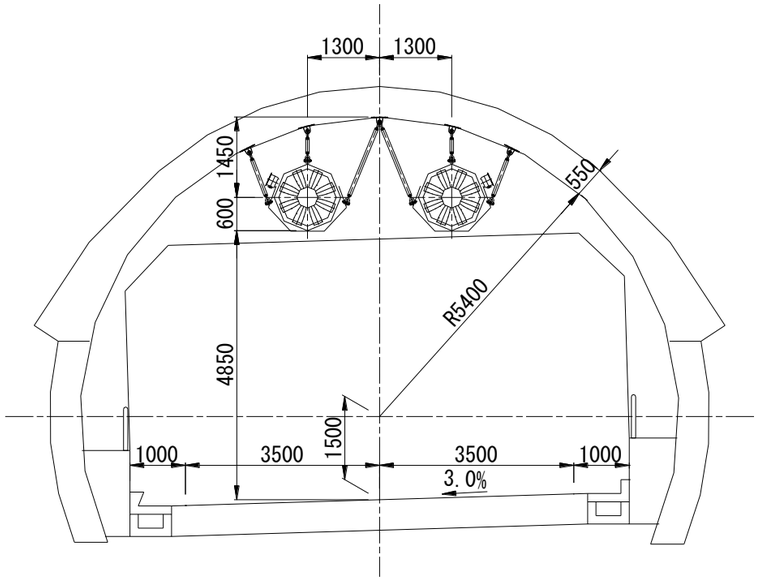
奥田トンネル（φ630×２台）



谷稲葉トンネル（φ1530×２台）



福島トンネル（φ1030×２台）



花立トンネル（φ1250×２台）

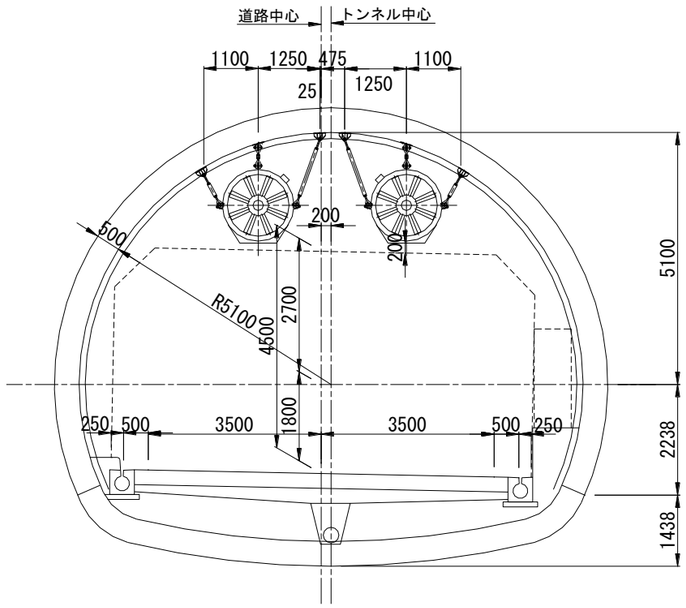


図 １５　ジェットファン設置のトンネル例

５　今後の道路トンネルの換気方式

排出ガス規制の効果による影響が大きく、一方通行の都市間高速道路トンネルの場合、延長 8.6 ㎞の恵那山トンネルでも自然換気の範囲にある。図 16 は、対面通行トンネルでジェットファン縦流式を採用するトンネルの供用年毎の最長トンネルをプロットしたものである。この図を見ると、一般道路トンネルを含む坑口対策を必要としない対面通行トンネルでは、ジェットファンの高性能化（高効率、高風速）の影響もあり年々採用する延長が延びてきており現在６ｋｍを超えるトンネルで採用されていることが認められる。

この他、天井板落下事故に伴い送気半横流のトンネルは、天井板撤去の方向にあり、ジェットファン式に移行していくことが想定される。また、都市間及び一般道路トンネルには、都市近郊への計画が増え環境対策としての坑口集中排気縦流式が採用されていくことが想定される。このようにこれからの換気方式の方向性が見出せるが、基準に示されるトンネル延長と対象換気方式の範囲を超える採用や、坑口集中排気縦流式のように、濃度の低い空気の排気に対する省資源・省エネルギー等への対応方法、火災時への対応、複雑なトンネルの煙のコントロール方法等に注意が必要となろう。

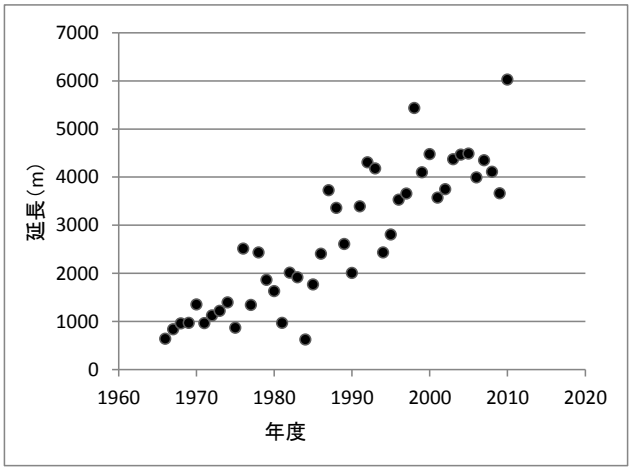
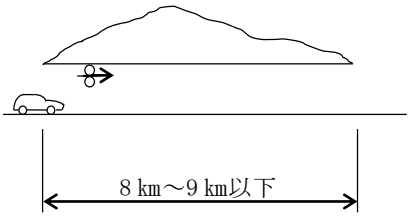
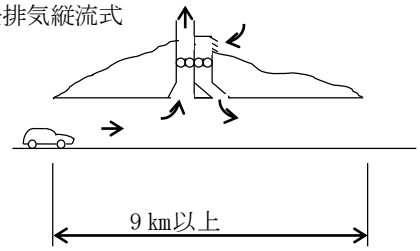
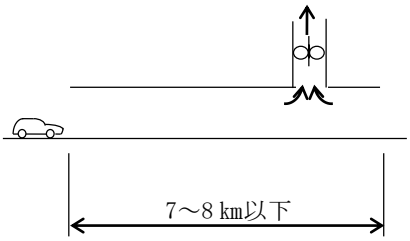
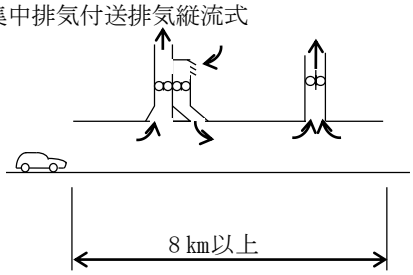
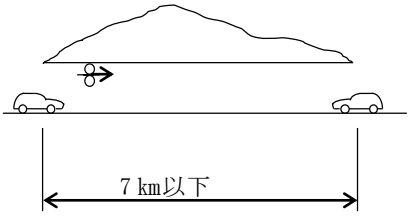
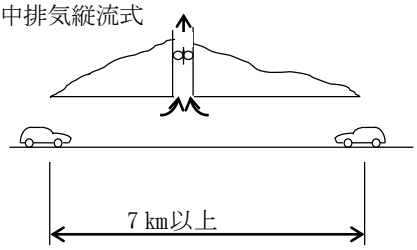


図　１６　対面通行トンネルのジェットファン縦流式採用年度別最大延長

これまでの結果を基に今後の道路トンネルの対象換気方式の目安を表 23 に示す。

表 ２３　今後の道路トンネルの換気方式と対象延長の目安

都市間 高速道路 トンネル	ジェットファン縦流式  送排気縦流式 
都市内 高速道路 トンネル	坑口集中排気縦流式  坑口集中排気付送排気縦流式 
一般道路 トンネル	ジェットファン縦流式  集中排気縦流式 

５－１　換気計画を行う際の課題

今後の換気方式の方向は見出せたが、このままの方向でよいのか、あるいは改善の余地があるのか現状での課題を整理しながら提案を行う。

道路トンネルの換気設備は、走行環境や維持管理作業環境の保全及び火災時の避難環境を確保する役割を持つ。これからの日本の道路トンネルの換気方式は、交通方式に関わらずジェットファン縦流式が主体となり、都市部、都市近郊部は、坑口集中排気縦流式を基本とする組み合わせ方式が採用されることが想定される。

ジェットファンは、換気用、圧力調整用の他に排煙用としても利用される。その特徴は、小型の設備でありその噴流効果により空気を誘引する方式なので車道と同一断面内に機器を設置する必要のあること、設備規模は、台数で対応可能で有ること等にある。また、対面通行トンネルでは、交通方向や自然風の方向にに合わせ可逆運転を行なうことにより運転動力を節減出来ることが挙げられる。圧力調整用としての利用は、都市部で採用される坑口集中排気の排気量を減少させるため車道内の流れの方向に逆らって運転する方法である。また、排煙用としては、縦流化により煙のコントロールを目的に設置され、一方通行の 1500ｍを超えるトンネル、対面通行の 3ｋｍを超えるトンネルの低風速化用（都市間高速道路トンネル）及び都市内高速道路トンネルの交通の先詰まり対策としての風速ゼロ化用に設置されている。

このようなジェットファンの採用に対し、笹子トンネルの天井版落下事故以来車道上部への機器の設置に対し落下対策の必要性が生じてきている。また、比較的短いトンネルを対象にしてきたので、長大トンネルの換気用としての採用に対し、流れを反転させるのに時間がかかりすぎて可逆運転が難しくなり、その特徴である経済運転が出来なくなることが想定される。

また、都市部のトンネルは、一方通行であり排出ガス規制効果で延長が 5～6ｋｍでも自然換気の範囲となる。この様なトンネルで坑口集中排気式を採用すると濃度の低い大量のトンネル空気を換気塔から排出するかジェットファンを利用し排気風量を減少させることになりいずれも非効率の計画になる。

これらの課題を対象路線ごとに表 24 に整理する。

表 ２４　道路トンネル換気計画上の課題

	都市間高速道路	都市内高速道路	一般道路
換気量の減少 （排気ガス規制効果）	・一方通行では排煙設備が対象となる。 （8 km程度のトンネルでも排煙設備となる）	・5～6 kmのトンネルは自然換気で可能となるが坑口対策のため大量の排気が必要となる。 ・換気設備規模 ・トンネル内の温度上昇。	・ジェットファン縦流式（対象延長が伸びる） ・現在 6ｋｍを超えるトンネルあり。
排煙設備 （煙のコントロール）	・1500m 以上は、専用の排煙設備の設置 ・対面通行の場合の長大トンネルは、低風速化制御を取り入れ煙をコントロール	・風速コントロールのために多くのジェットファン設置（火災対応専用：長大トンネル） （交通の先詰りを考慮）	・一部都市部のトンネルでは専用の排煙設備設置 ・排煙専用機の設置は、所轄の消防との協議。
課題	・排煙設備の設置方法（配置を含む）及び運転方法 ・火災シナリオと設備規模、風速コントロール	・低濃度排気風量の増大、風速コントロール用設備の増加 ・煙のコントロール ・避難環境 ・温度上昇*	・天井板撤去で換気ダクトのなくなった影響 ・長大トンネルの換気制御方法

上記課題に対して対応が行われているもの*後述する避難施設に関連するものもあるので、ここでは換気施設に関連する排煙設備の設置方法、対面通行のジェットファン縦流式以外の方法、風速零化設備の規模縮減等について対応方法を検討する。

＊：温度上昇：外気温度（トンネル内取り入れ空気）の上昇、換気規模の縮小・・・トンネル内温熱環境改善ミスト装置の設置[36]

５－２　換気計画上の対応方法

課題を整理すると以下のようになる。

（１）ジェットファンの採用

換気用、排煙用としてジェットファンが多く採用される想定に対する規模の縮小と省エネ対策

（２）坑口排気対策としての集中排気縦流式

一方通行の場合、ほとんど自然換気で対応できるトンネルの坑口対策としての排気設備規模縮減

（３）火災時の排煙

長大トンネルの煙のコントロー用排煙設備規模の縮減対策

５－２－１　ジェットファンの採用

今後、換気用、排煙用として状況に合わせ規模の増減が容易なジェットファンが主要な換気設備として利用されることが想定される。ジェットファンは、（車道）空間に設置することが条件となり数トンの設備の落下に対応する設置方法や維持管理も必要になる。現在、落下防止のために種々の検討がなされているが設置するジェットファン台数の減少や別の方法を検討することも一つの方法である。

（１）排煙設備の設置方法の一例

都市間高速道路トンネルは、主として山岳トンネルであり排煙用として車道上部にジェットファンを設置している。現状では、ジェットファンの落下防止に様々なフェイルセーフの方法が提案されているが、ここではこのジェットファンに変わるサッカルド方式の一例を示す。

名神高速道路の換気計画において縦流換気方式が検討されている[37]。これは、図 17 に示す様にトンネル中間部にサッカルド装置を設置するものでトンネル側面及び天井部にファンを設置し、その噴流で坑口からの空気を誘引する方法であり模型実験まで行われ効果が検証されている。

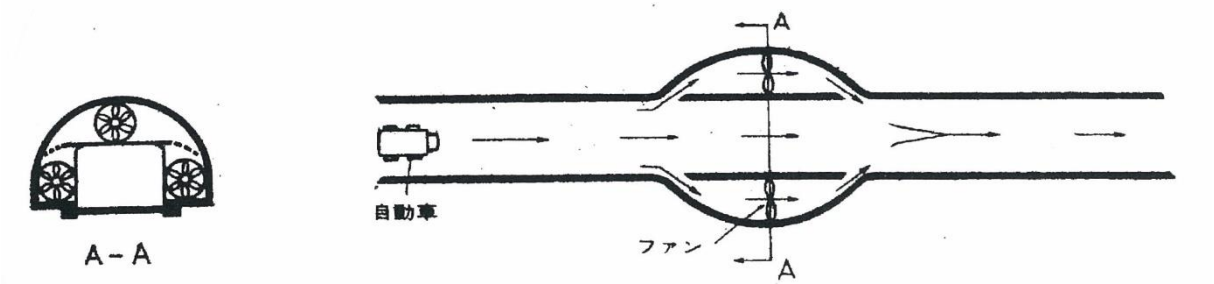


図　１７　名神高速道で計画された縦流方式

この方式は、縦流換気の経験の少なかったこと、火災時下流側の煙を拡散させること等により不採用となったがこれを応用することにより排煙設備として利用できる。

吹き出し位置を天井からではなく、サイドから行う。車道への影響を考慮すると噴出風速を高く出来ない等の課題は残るが火災時専用であることを考えると計画は可能である。

概略規模の試算例を表 25 に示す。

表 ２５　排煙設備の一例

トンネル延長(m)	ジェットファン (JF)	サッカルド装置 (Vs=25m/s)	備考
1500	JF1000×2	85m³/s×1 か所	トンネル断面：56.0m² 代表寸法：7.6m 交通量：2000(台/h) 走行速度：80 km/h 混入率：18(%) ノズル風速：25m/s
2000	JF1000×1 JF1250×1	100m³/s×1 か所	
2500	JF1250×2	65m³/s×2 か所	
3000	JF1000×2 JF1250×1	75m³/s×2 か所	

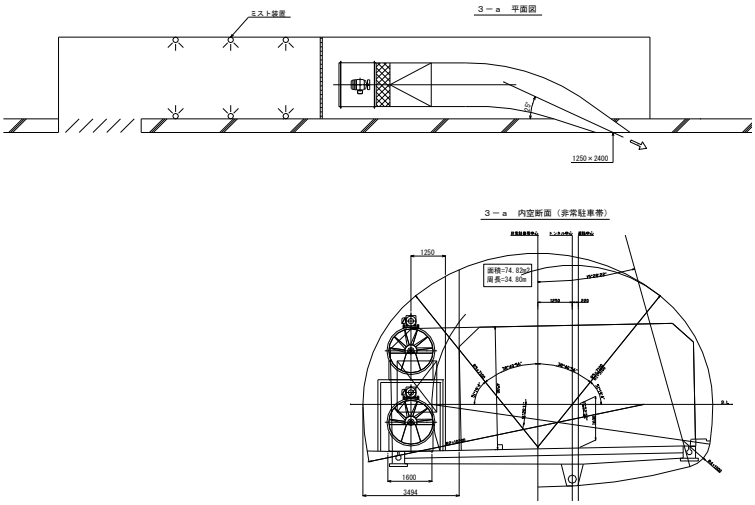


図 １８　サッカルド装置例

また、ファン保護のため（ダクト冷却設備）にミスト装置を設置することによりファン冷却だけでなくトンネル全体の温度を下げる効果も期待できる。30MW（9m² 火皿火災相当）の火災に対し、車道内風速 2m/s を確保し、トンネル全体に熱気流が拡散すると仮定すると平均温度は、120℃（風量 113m³/s、寄与率 60%、周囲温度 30℃）程度が想定される。

ミストの冷却効果を 90%とすると 100℃まで冷却するための必要水量は、以下に示す計算書のとおりほぼ 80ℓ/min 程度となる。また、火災時サッカルド装置が火災地点より後方にあっても排煙運転すると同時にミスト装置を稼働することによりトンネル内温度低下させるとすることができる。

ダクト冷却は、ファンの保護のためにファンを通過する気流の温度を 100 度まで冷却するための設備である。ここでは、柳、坂口、菊本らの発表論文［37］を基にミストの設備を設置した場合の水量を算定する。算出式は、以下のとおりである。

$$Q=\frac{(Tin-Tout)m_0Cp}{\varepsilon\ \eta}\times 60$$

$$Tin=\frac{g\cdot c\cdot s\cdot \alpha\cdot \beta}{m_0Cp}+T_0$$

ここで、

Q　：冷却に必要な水量（ℓ/min）

ε　：水の気化熱　2406（kj/kg）

η　：水の冷却効果　0.9（ミスト採用）

g　：燃焼物の燃焼速度 0.049（kg/s/m^2）ガソリン

c　：燃焼物の発熱量　46046（kj/kg）ガソリン

m_0　：加熱前の質量流量

Cp　：低圧比熱　1.005（kj/kg/k）

s　：燃焼面積　9（m^2）30MW 相当

α　：不完全燃焼係数　0.8

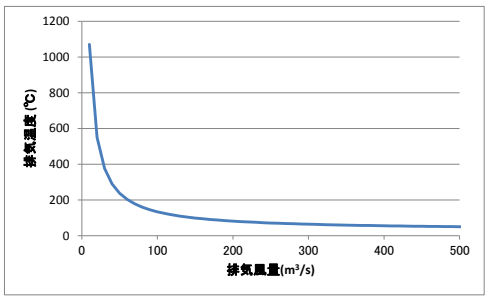
β　：燃焼損失係数　0.75

T_0　：加熱前の空気温度　30℃

Tout：保護温度　100℃

Tin　：冷却区画に流入する空気温度

上記条件をもとに、排気風量ごとに流入温度及び必要水量を算定した結果を図 19 に示す。排風量 112m^3/s（2m/s×56m^2）のときの必要水量はほぼ 80ℓ/min となる。



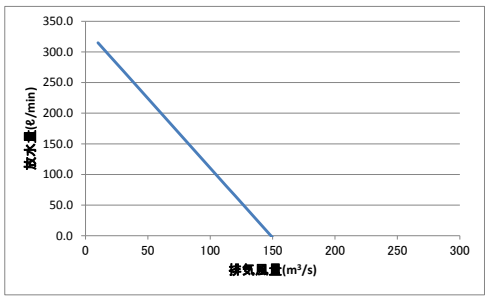


図　１９　排気温度と放水量

（２）対面通行で避難通路を有するトンネルの換気

最近は、長大トンネルも殆どジェットファン縦流式が採用されている。延長が長くなるとジェットファン台数が多くなる。このジェットファン方式は、交通量比率の偏りを利用し多い方向に運転することで経済的な運用が出来ることが特徴となる。しかし、延長が長くなると流れを反転する時間が長くその分トンネル内走行環境が悪化しその特徴を十分に発揮できない。そこで、長大トンネルの避難通路を換気坑（送気）として利用しトンネル中央部付近で車道に新鮮空気を供給する集中送気縦流式を提案する。ジェットファン式に比較し新鮮空気を中央から供給することにより車道内流量が 1/2 となるので抵抗が少なくなりジェットファンの台数を減らすことが可能となる。この方式の場合、大型ファンを両坑口に設置し避難坑断面を有効に利用することにより換気動力をジェットファン式より減少させる（換気坑内風速 1/2）ことが出来る。また、このファンは避難通路用の換気ファンとしての利用もできるので通常、車道内の煙の侵入を防ぐために 2 枚設置される避難連絡通路の扉（避難口）を 1 枚にする可能性がある。（通路内の圧力にもよる）この他、送気口位置を追加することにより交通量比率による流れの変化に早めの対応が出来、中央で流れの方向が左右に分かれるので火災時の風速零化にも有効である。また、トンネル延長を 6500m とするとジェットファンで交通方向に合わせた運用を行うために流れを反転しようとすると 25 分程度の時間を必要とする。これでは、運用が限られこれに対応するために一方向で運用すると換気動力が増加することが想定される。

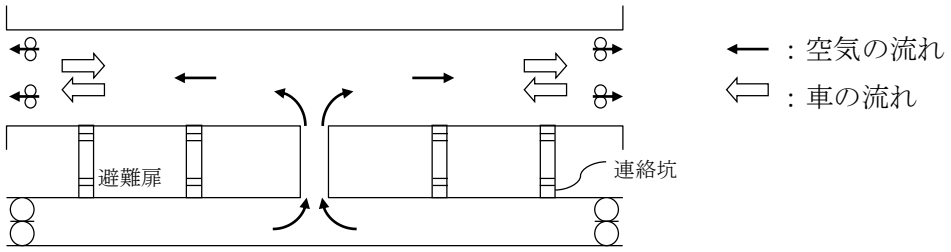


図 ２０　集中送気縦流式のモデル

ちなみにトンネル延長 6500m で以下に示す条件で設備規模を比較すると換気動力が大幅に減少する。また、工事費、運転動力も経済的となり天井部への機器の設置も少なくなる。

表 ２６　試算例

	ジェットファン縦流式	集中送気式	備考
交通条件	1925（台/ｈ）	同左	Ar：トンネル断面積 Dr：トンネル代表寸法 JF1250：高風速ジェットファン口径 1250
大型車混入率	30（%）	同左	
走行速度	40（km/ｈ）	同左	
交通量比率	5：5	同左	
トンネル断面	Ar=60(m^2)、 Dr＝8.0(m)	同左	
所要換気量	250（m^3/ｓ）	同左	
設備規模	JFX1250×43 台	JFX1250×5 台 φ2000（軸流ファン）×4 台	
電動機出力	2150Kw	JF　250Kw 軸流　540Kw	

本計画は、新たに換気坑を設置するのではジェットファン縦流式の方が経済的となるが、換気と組み合わせることにより避難通路を設置しやすくなる利点もある。

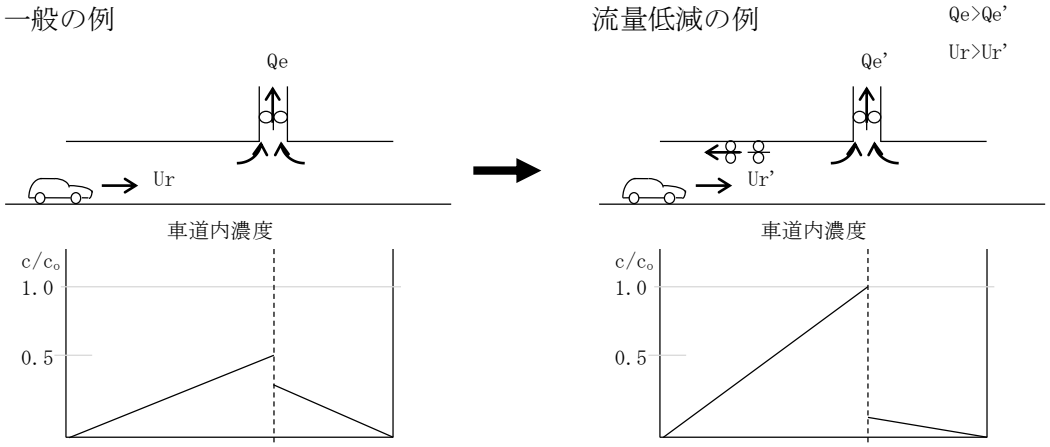
５－２－２　坑口集中排気方式の排風量及びジェットファン設備

一方通行トンネルの環境対策用の換気方式は、坑口集中排気式（送排気との組み合わせ含む）が基本となる。自動車の排気ガス規制の効果によりトンネル延長 5km 程度でも交通換気（自然換気）で対応可能であり坑口対策のために集中排気式を採用すると設計濃度以下の空気を換気塔から排出させることになる。最近は、車両からの排出量が減少してきているので設備規模を小さくするいくつかの試みがなされている。

①排出ガス量の減少に伴う坑口流出空気量の増の容認

②坑口持ち出し量の解析（車両による持ち出し現象と量）

①は、環境基準を守れる坑口排出量まで許容する考え方である。②は、車両の走行による持出し量を種々の条件で三次元シミュレーションにより細かく求め利用する方法である。これらの方法の利用についての結論は出ておらずここでは、従来の坑口付近の排気口から流入量の 100% 以上を排気する場合について提案を行う。集中排気を採用する都市内トンネルは、全排気量に対し空気処理を行なっており、経済面から流入量を減少させる工夫が行われている。一つは、天井の空間に仕切板（じゃま板）を設置、もう一つは、ジェットファンを逆転しそれぞれ流れに対し抵抗を与える方法である。じゃま板は、維持管理、耐久性の面から採用されなくなって来ており風量制御に有効なジェットファンが採用されてきている。



C/C_0=1.0:設計濃度

図　２１　坑口集中排気縦流式の流量低減方法による車道内濃度

この方法は、ジェットファンの逆転運転により、電力費がかさむこと、入り口側の濃度を設計濃度まで制限すると交通状況（走行速度、交通量、混入率等）を正確に把握しないと交通量の落ち込みにより流量が急に減少し車道内濃度が悪化する恐れのあること、天井に設置される数多くのジェットファンの維持管理等の課題が挙げられる。

この課題の根本的な対応方法は難しいが若干でも低下させる一例を挙げる。

これは、排気口を入り口側、出口側の 2 箇所を設けることにより出口側の殆ど汚染されていない排気は空気処理をしないでそのまま大気に放出するか当該路線あるいは反対車線に流れと反対向きに流すことにより抵抗として利用、持ち込み風量を減少させる装置として利用する方法である。また、火災時に反対車線の進行方向に流すこと（排煙設備）によりサッカルドとして利用することも考えられる。

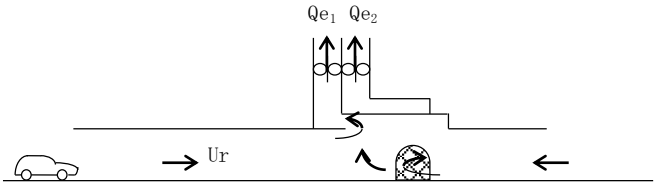


図 ２２　排気口２か所のイメージ図

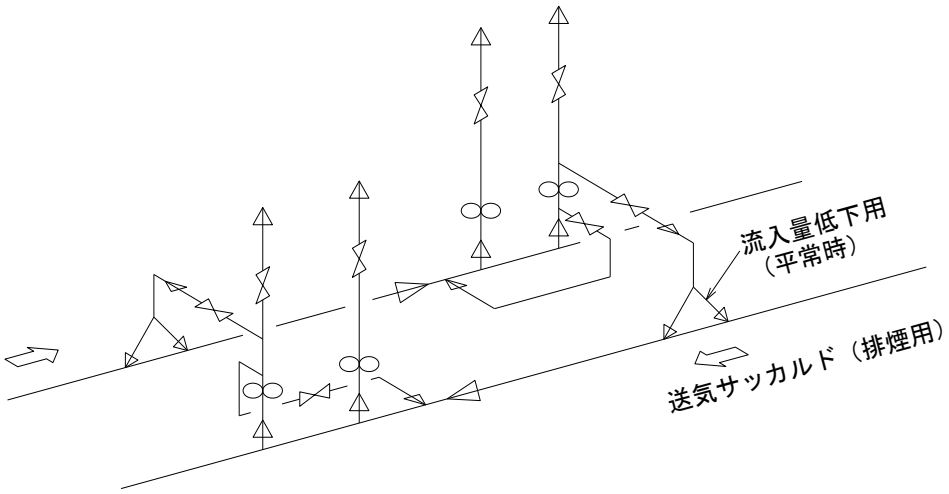


図 ２３　坑口集中排気縦流式の換気系統のイメージ図

５－２－３　風速零化設備の減少方法

（１）風速零化設備規模

都市内高速道路トンネルは、風速零化設備を設置することが前提となる。ここでの風速零化設備は、ジェットファンで対応する。この設備規模は、次の条件のもとに算定する。

① シナリオは表 40 のとおりとする

② ジェットファンによる煙の拡散を防ぐために煙の移動距離とジェットファンの噴流の影響範囲を考慮し、火災地点より 1 ㎞の範囲にあるジェットファンの運転は避ける。

③坑口集中排気装置は、換気制御の指令が行われて 60 秒で停止する。そのときの風量は直線的変化とする。

④ ジェットファン同時起動台数は、4 台とする。+

⑤ 零化までの時間は、発熱速度が急上昇する手前の 240 秒以内とする。(表 56 発熱速度参照)

トンネルの換気設備規模は、表 43 に示す通りとする。延長 4 ㎞、6 ㎞は、排風量を減少させるために 8 ㎞の場合は、入口からの持込風量を増加させるためにジェットファンを設置している。初期は全設備を運転している状況にある。表２８～３０は、延長ごとに零化に必要な設備規模示したものである。

表 28 は、トンネル延長 4 ㎞で入り口側、中央、出口側で火災が発生した場合の必要な設備規模を求めたものである。この結果から設備規模は、トンネル入口、出口の両ヶ所で火災が発生した場合に決まるので 6 ㎞、8 ㎞は、トンネル両坑口火災時のみ示した。

表 ２７　風速零化規模

概要	 交通量 2920 台/h 大型車混入率 25% 走行速度 43 ㎞/h					
	4 ㎞		6 ㎞		8 ㎞	
換気規模	入口側設置	出口側設置	入口側設置	出口側設置	入口側設置	出口側設置
	10 台	3 台	22 台	7 台	42 台	24 台
	13 台		29 台		66 台	
	換気用入口側 8 台(兼用)		換気用入口側 2 台(兼用)		換気用入口側 17 台(兼用)	

表 ２８　トンネル延長４kmの場合の設備規模

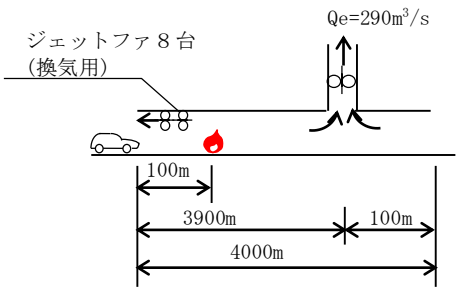
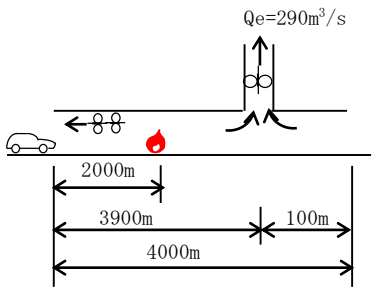
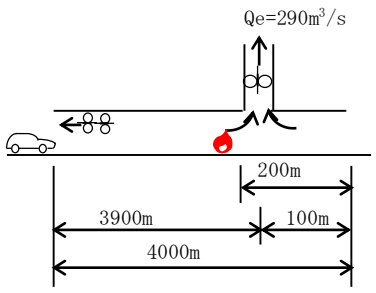
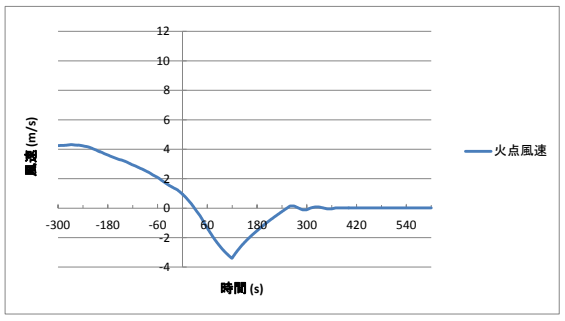
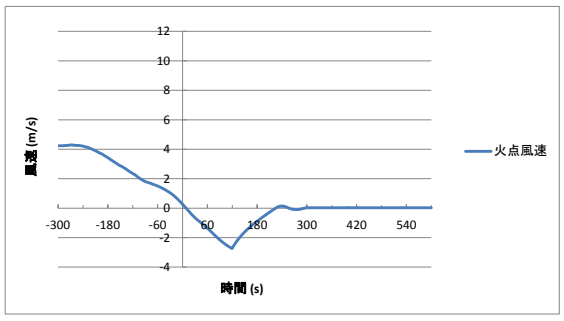
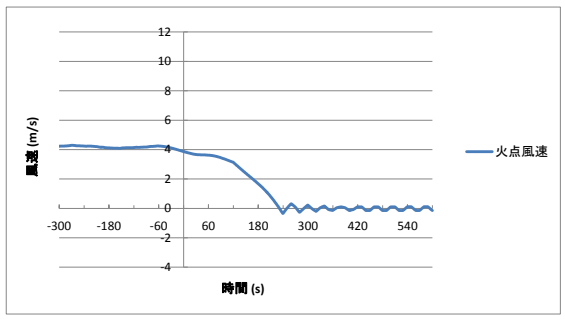
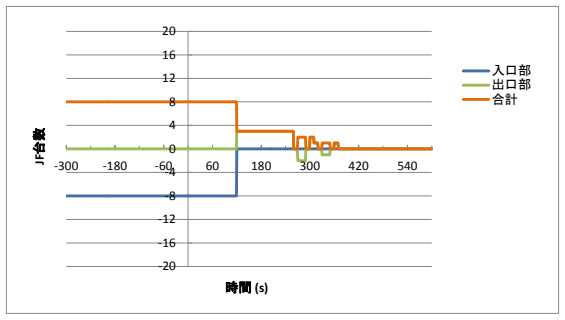
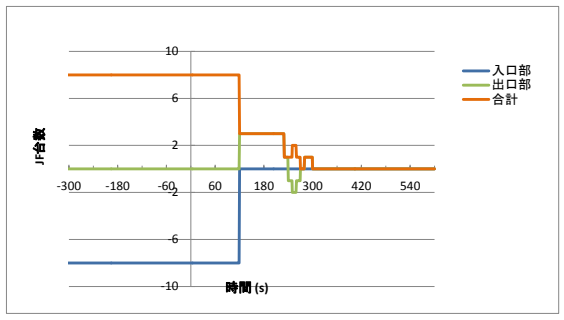
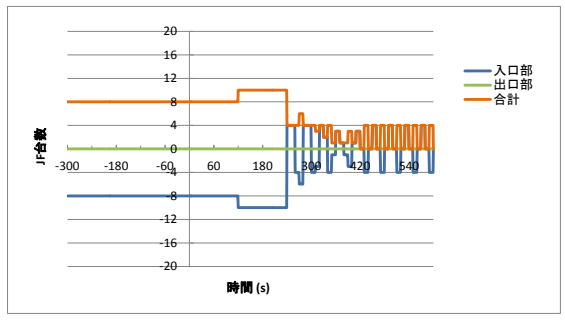
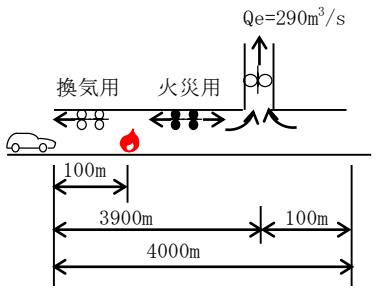
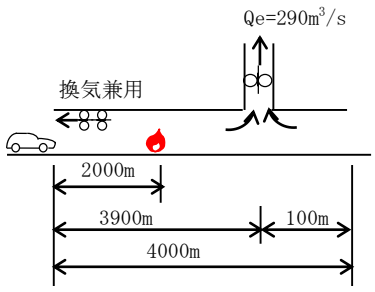
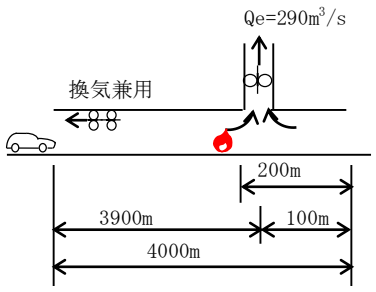
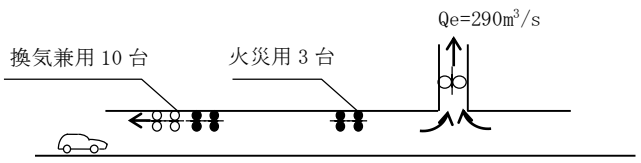
	火点トンネル入口	火点トンネル中央	火点トンネル出口
概要			
火点風速			
ジェットファン運転			
設備規模			
	換気用 ／ 火災用	換気用 ／ 火災用	換気用 ／ 火災用
	８台 ／ ３台	８台 ／ （３台）	８台 ／ （10 台）
	11 台	８台（換気兼用）	10 台（換気兼用）
	 入口側 10 台 出口側 3 台 計 13 台		

表 ２９　トンネル延長６kmの場合の設備規模

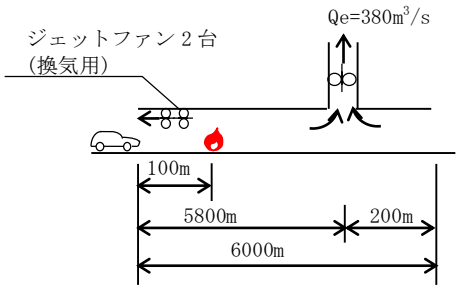
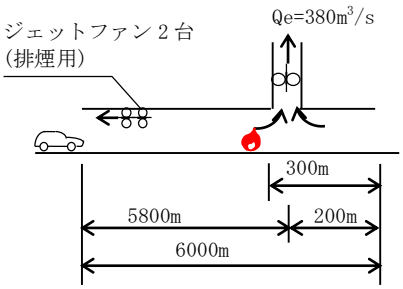
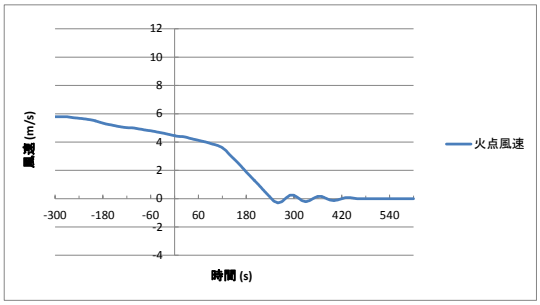
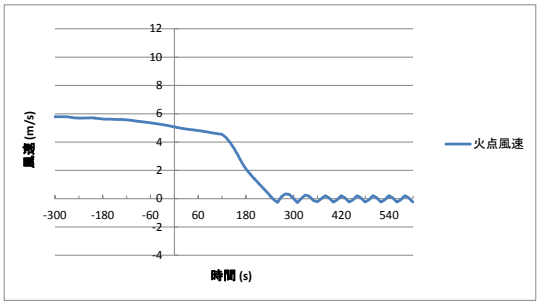
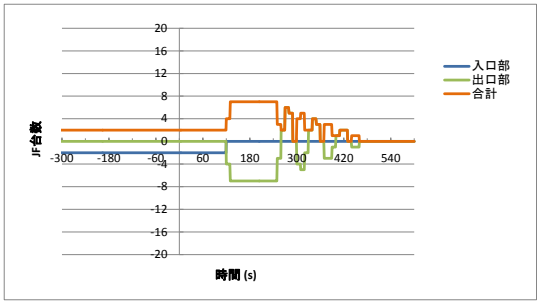
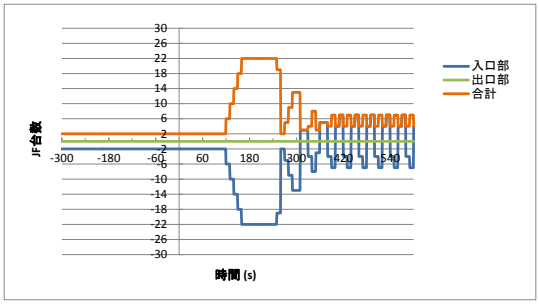
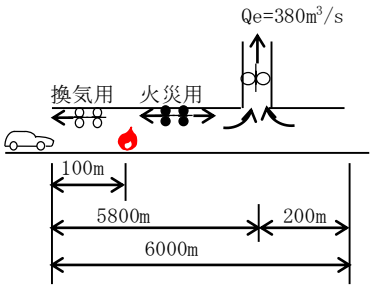
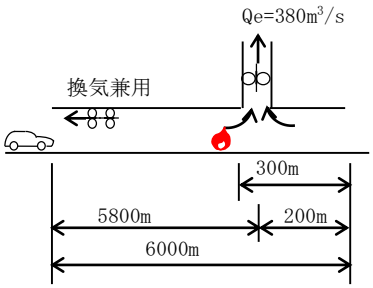
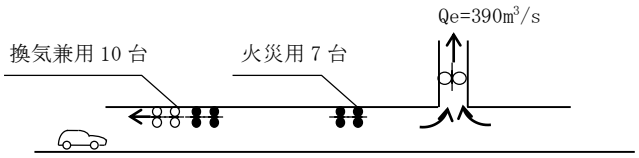
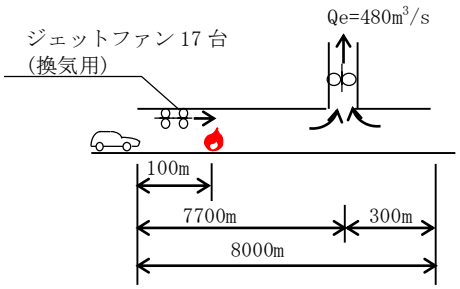
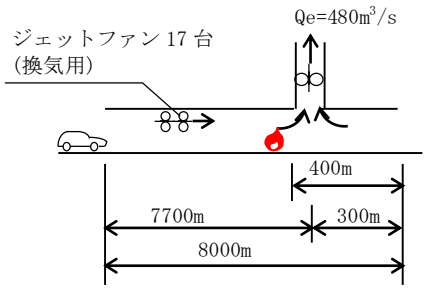
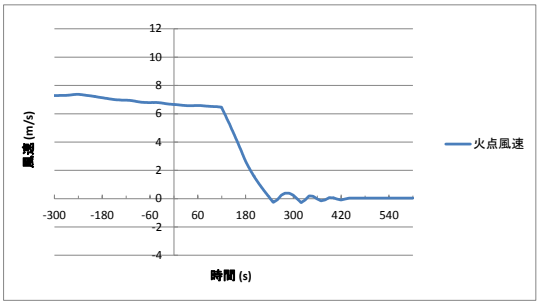
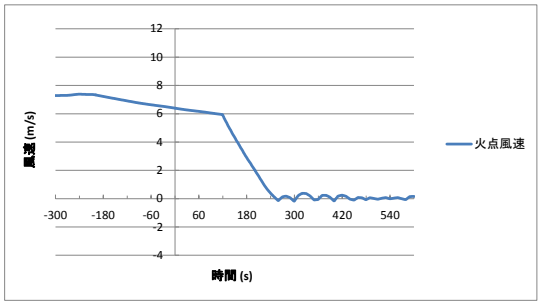
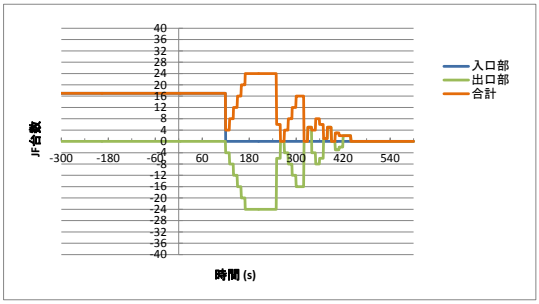
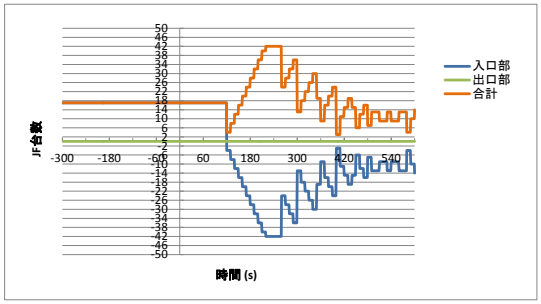
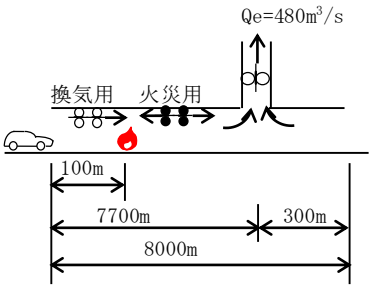
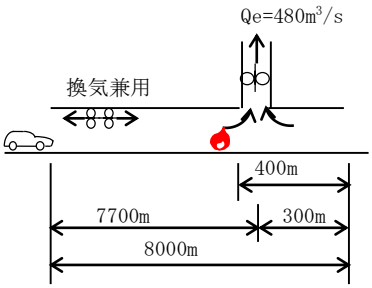
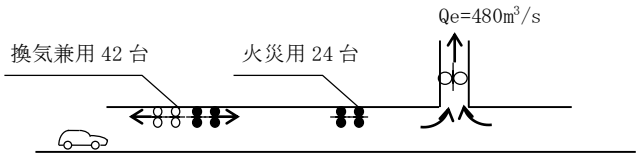
	火点トンネル入口	火点トンネル出口
概要		
火点風速		
ジェットファン運転		
設備規模		
	換気用：２台 火災用：７台 ９台	換気用：２台 火災用：（22 台） 22 台（換気兼用）
	 入口側 22 台 出口側 7 台 計 29 台	

表 ３０　トンネル延長８kmの場合の設備規模

	火点トンネル入口	火点トンネル出口
概要		
火点風速		
ジェットファン運転		
設備規模		
	換気用：17 台 火災用：24 台 41 台	換気用：17 台 火災用：（42 台） 42 台（換気兼用）
	 入口側 42 台 出口側 24 台 計 66 台	

（２）風速零化設備の減少方法

風速零化設備は、交通換気力や空気の慣性力に影響される。前記した設備規模は、火災発生 120 秒後にトンネル坑口を閉鎖した条件のものである。そこでトンネル内でも交通を停止させた条件で設備規模を求める。トンネル内 1 kmピッチで情報板又は信号等で車両が停止すると仮定し設置台数の多い 6 km及び 8 kmで試算すると、トンネル延長が長くなるほど減少する台数が多くなる。ちなみに交通条件（設計交通容量）ごとに整理したものを表 31 に示す。

表 ３１　トンネル内交通制御と零化設備

交通量		3070（台/h）		2920（台/h）		2790（台/h）	
大型車混入率		20%		25%		30%	
走行速度		43（km/h）					
換気規模	交通制御	坑口のみ	トンネル内	坑口のみ	トンネル内	坑口のみ	トンネル内
	6 km	27 台	13 台	29 台	14 台	30 台	13 台
	8 km	62 台	34 台	66 台	34 台	68 台	34 台

トンネル延長 6 kmと 8 kmの場合、換気用ジェットファンの運用方法が異なること、6 kmの場合は、交通条件によって台数が変わらないが 8 kmの場合は混入率が増加するにしたがって換気用の台数が増加するので（表 43 参照）零化の台数が増加する。またトンネル内で交通制御を行うと零化に必要な設備規模がほとんど変わらないことも認められた。以上のように、トンネル内で交通制御できるならば換気規は大幅に低減される。

表 ３２　交通制御と設備規模（6 km）

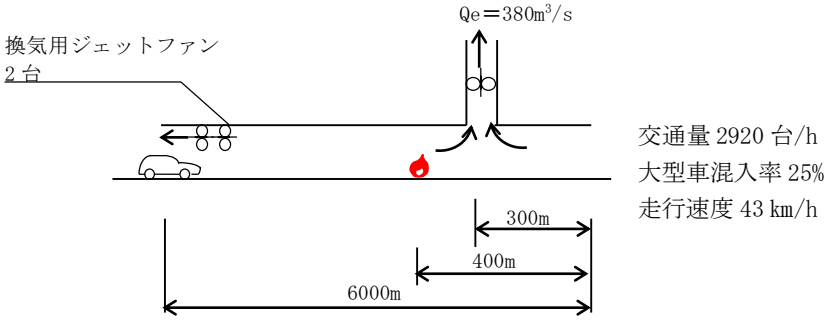
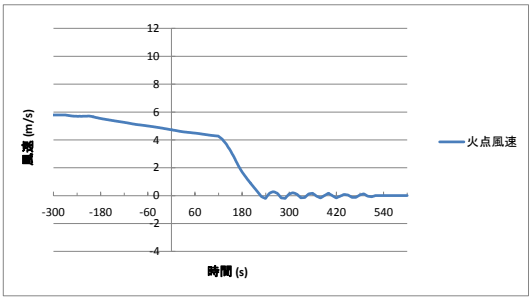
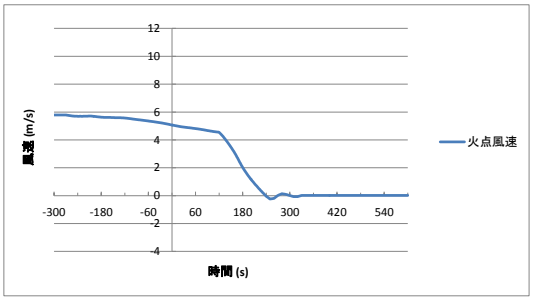
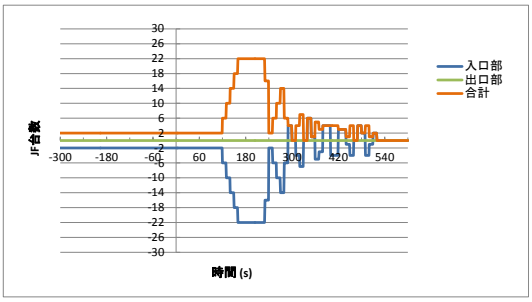
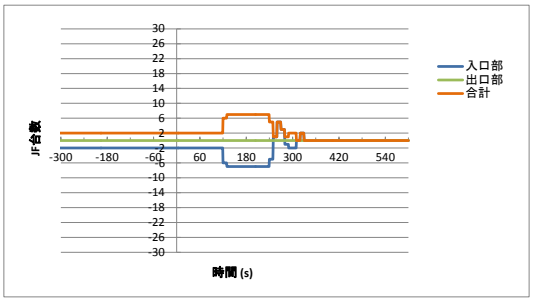
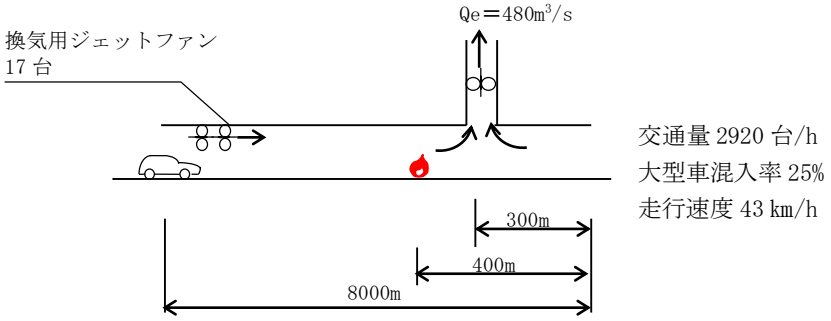
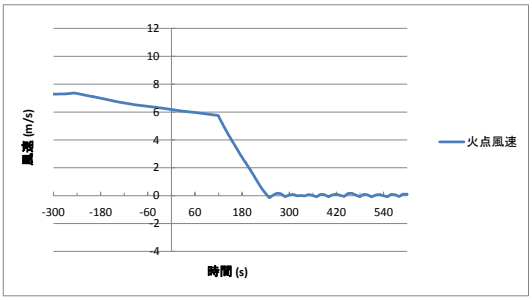
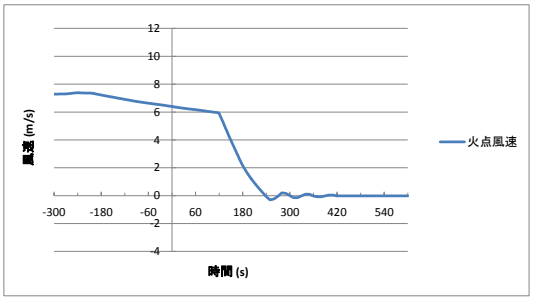
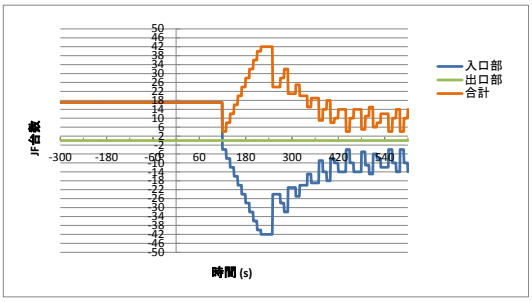
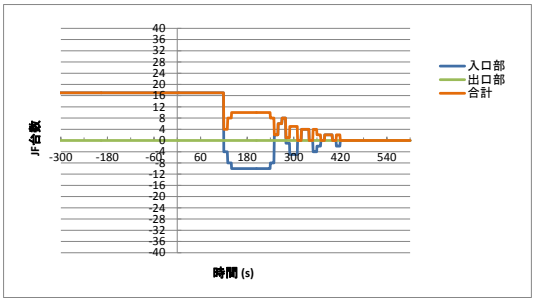
<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td></td><td>交通制御：坑口のみ</td><td>交通制御：坑口、トンネル内</td></tr>
<tr><td>火点風速</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>ジェットファン運転</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>設備規模</td><td>出口火災：入口側設置：22 台
入り口火災：出口側設置：7 台
計：29 台</td><td>出口火災：入口側設置：7 台
入り口火災：出口側設置：7 台
計：14 台</td></tr>
</table>

表 ３３　交通制御と設備規模（8 km）

<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td></td><td>交通制御：坑口のみ</td><td>交通制御：坑口、トンネル内</td></tr>
<tr><td>火点風速</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>ジェットファン運転</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>設備規模</td><td>出口火災：入口側設置：42 台
入り口火災：出口側設置：24 台
計：66 台</td><td>出口火災：入口側設置：10 台
入り口火災：出口側設置：24 台
計：34 台
注）換気用を入口側と出口側に分散配置する。</td></tr>
</table>

６　排煙設備と避難施設

火災時の換気設備は、使い勝手により排煙設備と称している。その排煙設備は、トンネル内で火災が発生した場合に避難環境の確保や救急消火活動の支援のために利用される。従来、この排煙設備は換気設備を有効に利用することを基本としてきた。しかし、1999 年～2000 年にかけての海外の相次ぐ長大トンネルの火災事故や日本の排出ガス規制の効果に伴う所要換気量の減少による換気方式の変化（縦流化）、換気設備規模の減少などから都市内高速道路トンネルや都市間高速道路トンネルでは、煙をコントロールするために積極的に排煙専用の設備が設置されるようになってきている。また、避難環境を確保するために避難施設の計画と密接に関連してきている。

６－１　排煙設備と火災時の対応

道路トンネルの避難施設、排煙設備の設置及び運用方法は、対象路線により決まる。この避難施設と排煙設備の運用により有効な避難環境を実現させている。

（１）避難施設

避難施設は、道路利用者を火災発生地点から安全空間（地上、明り部）まで避難させるために設置するもので避難通路、避難連絡坑、避難口などがある。日本における設置基準等を表 34 示す。

表　３４　避難施設の設置

対象路線	交通方式	延長	避難施設	備考
都市間高速道路トンネル	対面通行	3 km未満	－	
		3 km以上	避難通路、避難連絡通路	避難連絡通路間隔 350m
	一方通行	0.75 km未満	－	
		0.75 km以上	反対車線利用、避難連絡坑	避難連絡坑間隔 750m 程度
都市内高速道路トンネル	一方通行	－	非常口 同一路線内（独立避難通路、本線下部）又は反対車線	標準 250～350m 間隔 急勾配：そのつど検討
一般道路トンネル	対面通行	3 km未満	－	
		3 km以上	避難通路、避難連絡通路	交通量 4000 台/h 以上 避難連絡坑間隔 350m 程度

都市間及び都市内高速道路トンネルの避難施設の内容を表 35 に整理する。

表 ３５　避難施設の内容

	交通方式	避難施設	備考
都市間 高速道路 トンネル	対面通行（暫定）	避難通路→（坑口） 避難連絡坑（350m 間隔）	トンネル延長 3 km以上
	一方通行	避難通路（反対車線）→（坑口） 避難連絡坑（750m 間隔）	トンネル延長 750m 以上
都市内 高速道路 トンネル	一方通行	避難階段→（地上）※ 避難通路トンネル下部→（地上）※ 同一本線図（地上）※ 反対車線→（地上、坑口）	シールドトンネル 非常口間隔 400～250m（勾配 2%程度）

※避難通路換気設備有

図 24 は、関越トンネルで暫定二車時の避難通路をそのまま残した例である。二車線で供用された下り線はほぼ 350m で避難連絡坑が設けられ、一方通行の上り線は、下り線の避難連絡坑の２本に一か所で計画されている事が認められる。このように、独立した避難通路を四車完成時まで残した例は関越トンネルと恵那山トンネルしかない。一般的には、避難通路は一方通行時反対車線の本線となる。また図 26 は、当初より一方通行の例で避難連絡坑は 750m 程度である。図 27～28 は、都市内高速道路トンネルのトンネル下部及び同一路線内の避難通路（独立避難通路）の例である。

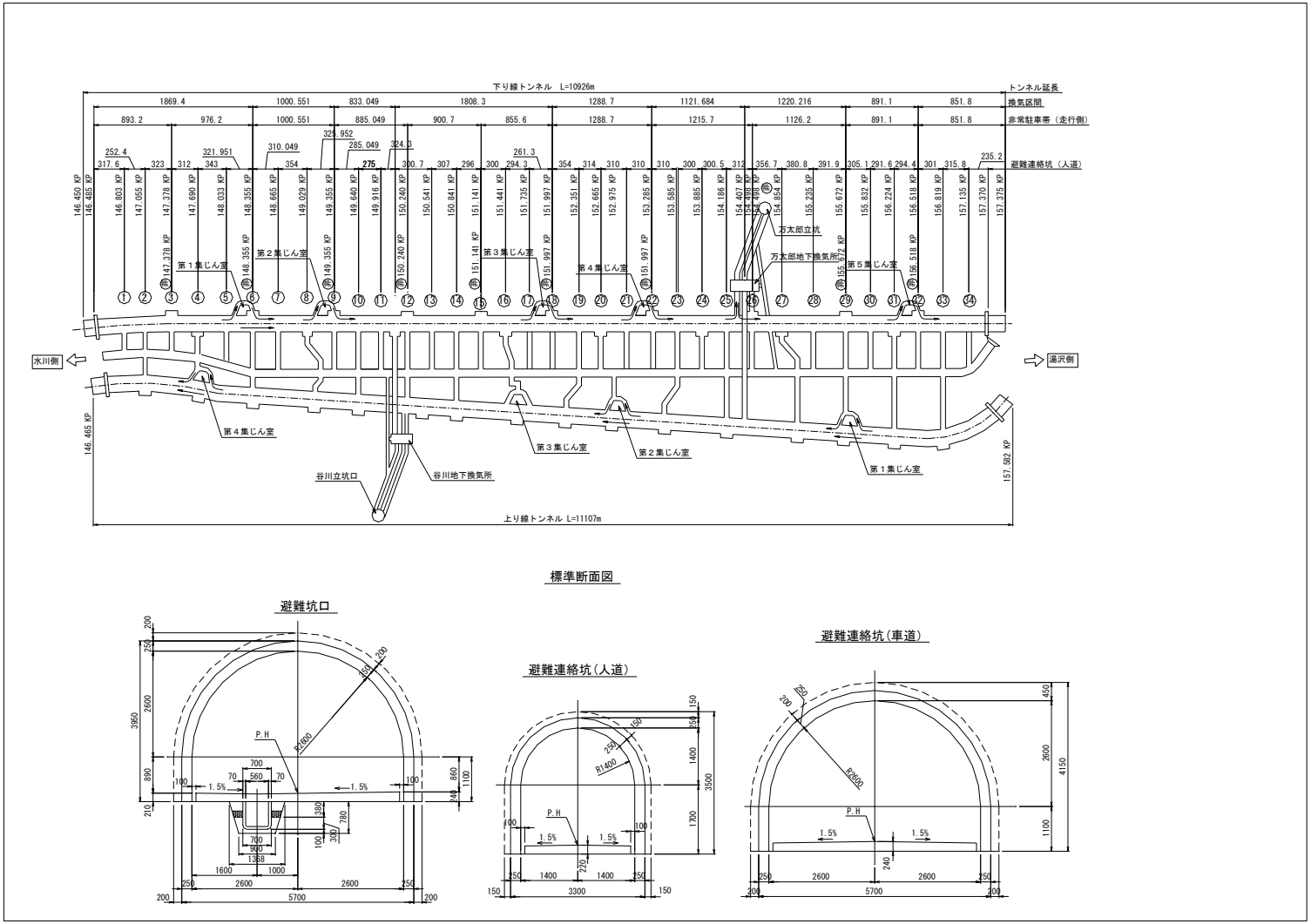


図 ２４　関越トンネル概要図（避難通路）

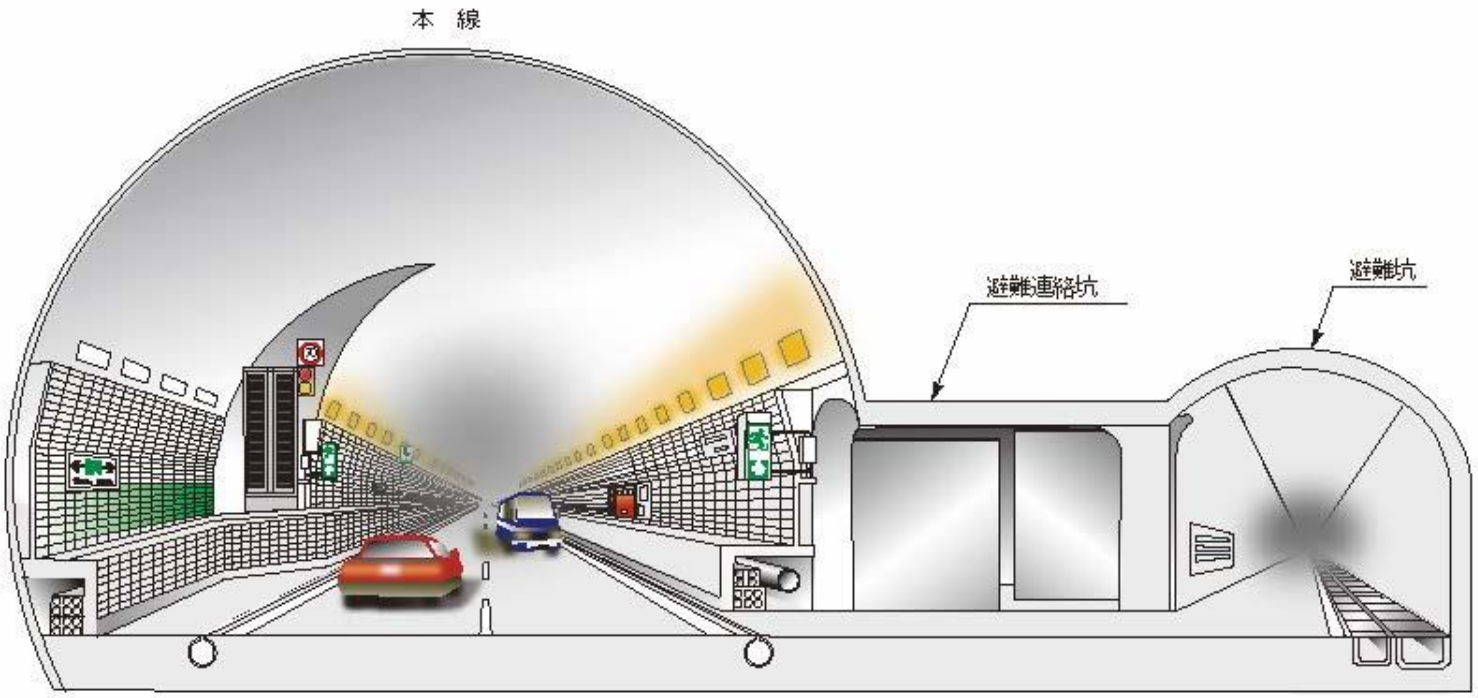


図　２５　都市間高速道路トンネル避難通路の例

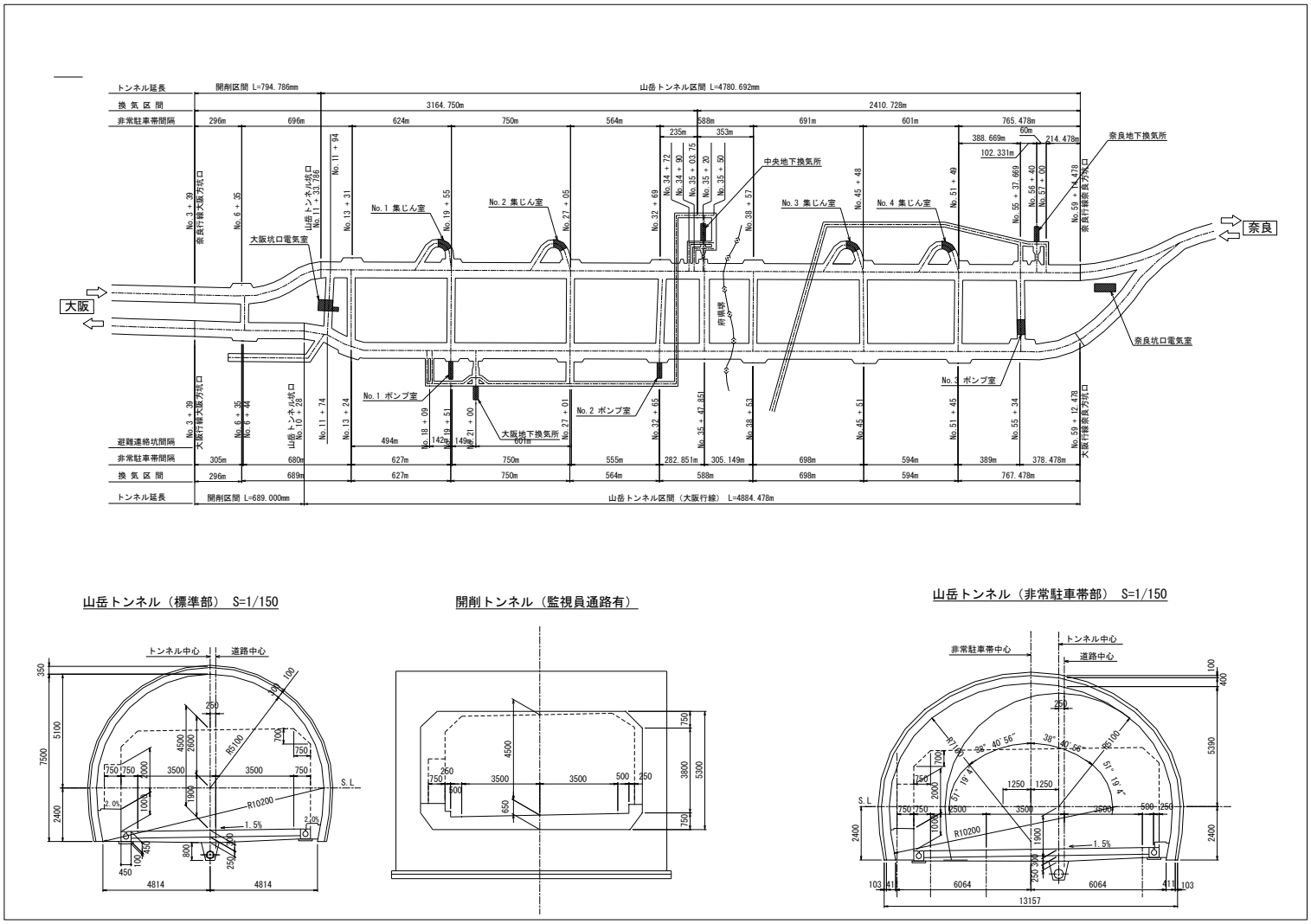


図 ２６　阪奈トンネル概要図（避難通路）

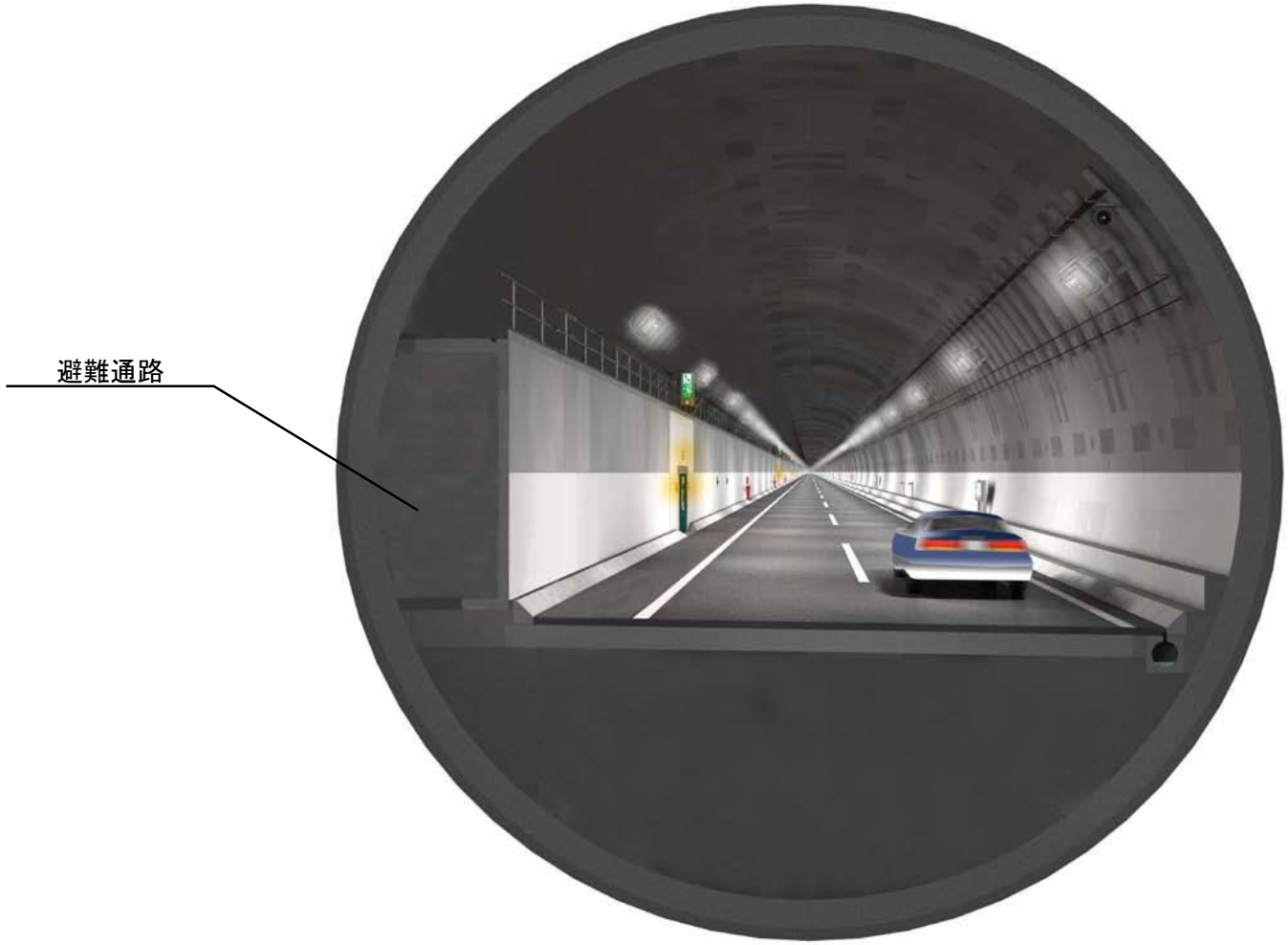


図　２７　都市内高速道路トンネル避難通路（本線部）の例その１

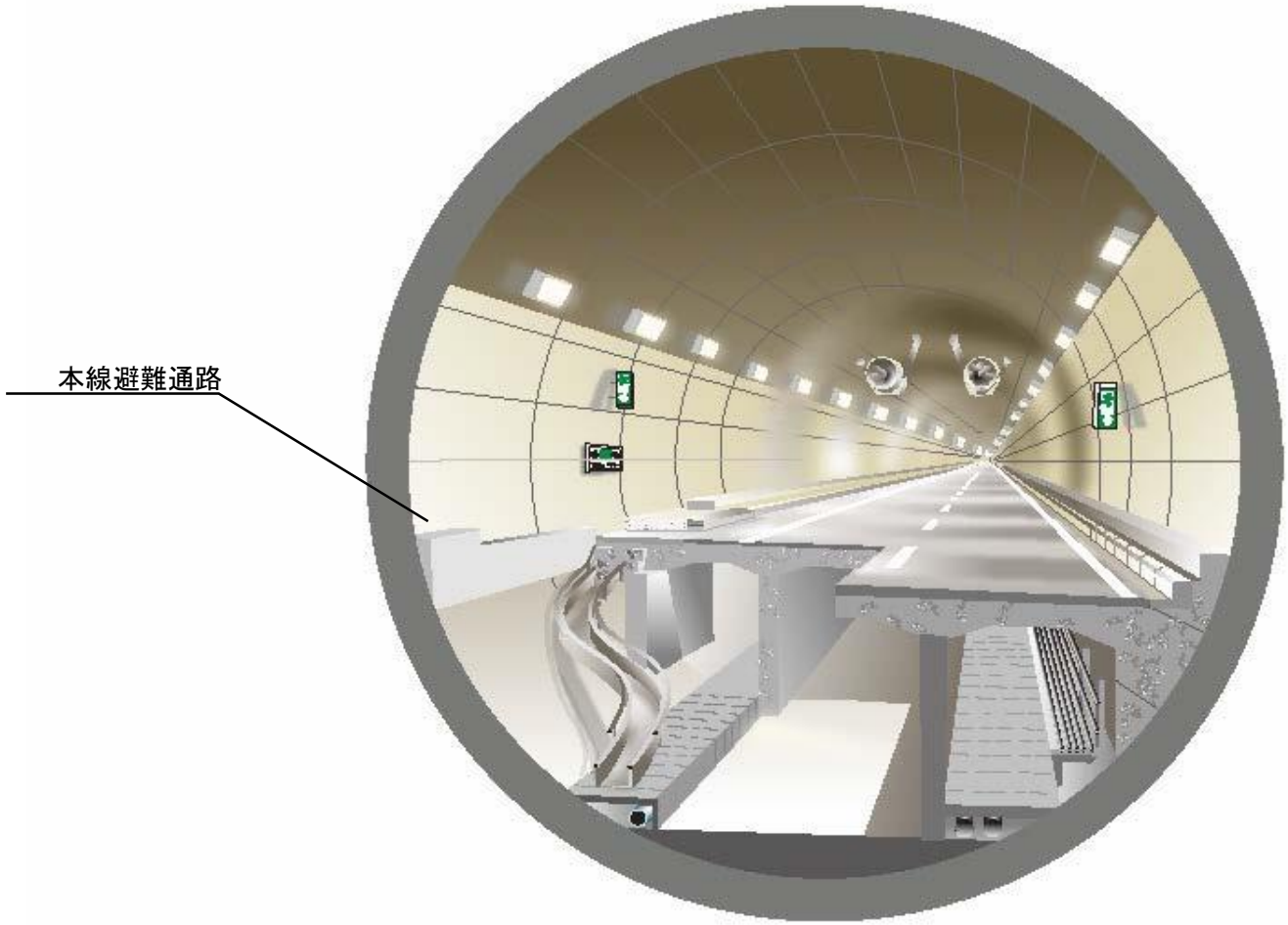


図　２８　都市内高速道路トンネル避難通路（本線部）の例その２

（２）換気方式と避難施設の歴史

避難施設は、交通方式、交通量、換気方式、トンネル構造や立地条件による影響が大きい。都市内高速道路トンネルは、トンネル構造により当該車線の路面下や車線内に避難通路を設置するか直接地上に連絡する避難階段を設置している。この他、沈埋トンネルのように、路線間に設置している例もある。交通量が多く地上までの距離が短いのでトンネルが造られた初期より避難施設が設置されていた。一方、都市間高速道路トンネルは、当初換気方式に頼り排煙することで対応していた。しかし、縦流換気を採用するに当って換気設備が排煙設備としての機能を発揮出来なくなった。そこで、当初水抜坑等工事用に使用することを理由として本坑に並行して水平坑を設置し、本坑との間を連絡坑で結ぶことにより避難通路として利用することが行われた、その後都市間対面通行長大（L＝3 km以上トンネル等級 A 以上）トンネルに避難通路を設けることが決められた。防災設備に関する基準（設計要領第 3 集　日本道路公団：1979 年（事務連絡）[35]、トンネル非常用設置基準 1981 年[36]）では、“排煙設備又は避難通路”と同等の扱いとなり、1980 年代の長大トンネルの換気方式の選定に当っては横流、送気半横流式と避難通路付の縦流式の比較を行い採用する換気方式を選定している。表 36 は、関越トンネルに縦流式が採用される以前のトンネルに火災時対応として排煙効率の良い大排煙口送気半横流式が採用された例を示す。関越トンネル以降経済比較の結果から避難通路付縦流換気方式の採用に移っている事が分かる。

表　３６　都市間高速道路トンネル換気方式と避難通路（対面通行時）

	避難通路	トンネル延長 (m)	換気方式	供用(年)	備考
笹谷トンネル	×	3384	送気半横流式	1981	大排煙口付
関越トンネル Ⅰ期線	○	10926	集じん機付 排気縦流式	1985	
市振トンネル Ⅰ期線	○	3326	集じん機付 縦流式	1988	
子不知トンネル Ⅰ期線	○	4555	集じん機付 縦流式	1968	
肥後トンネル Ⅰ期線	○	6340	集じん機付 送排気縦流式	1989	

なお、避難通路又は反対車線に避難するための避難連絡坑は、対面通行の場合 350m 程度、一方通行の場合、その 2 倍の 700m 程度としている。この 350m は、関越トンネルの計画時（1977 年）のスイスの道路トンネル設計基準 300m 及び当時の日本の救助隊用の標準呼吸器具 5ℓ型空気ボンベ（空気圧 150 気圧）を用いて重複できる距離の片道分 360m[39]をもとに決められている。

空気消費量 40～50ℓ/min
活動時間 5ℓ×150　÷50ℓ/min=15min
} 歩行速度を 0.8m/s とすると
15×0.8×60＝720m

これ以降 750m 以上の一方通行トンネルは、既設を含め連絡坑が設置されるようになってきている。一般道路トンネルは、対面通行で延長も３km 程度以下だったので送気半横流式を採用し排

煙で対応してきた。

笹子トンネルの事故以後の天井板撤去による既設を含め縦流化により、3km 以下の対面通行トンネルは、避難場所が坑口に限定されるので火災時の状況を把握し、対応方法を検討することが望まれる。

注）関越トンネルの計画に先駆けて一方通行トンネルの避難連絡坑は、1976 年の設計要領第 3 集で非常駐車帯の設置にあわせ 2000m 以上のトンネルを対象に 1000m 間隔で設置することが決められ、その後 750m へと変わっていった。（1979 年　設計要領第 3 集）

（３）排煙設備

道路トンネルの排煙設備は、設置される換気機の範囲内で行うことが原則であったが、道路公団においては、昭和 53 年、平成 9 年に次のように定めている。

✧　設計要領第三集（昭和 53 年）[22]

“一方向通行トンネルで上下いずれかに換気機が設置される場合には、もう一方のトンネルにも排煙設備としてファンを設置し、また、上下いずれのトンネルにも換気設備を必要としない場合でも、延長が 1.5km を超えるトンネルには防災用としてファンを設置する事が望ましい。

✧　設計要領第三集（平成 9 年）[33]

延長 1.5km を越えるトンネルには防災用としてファンを設置することが望ましい。この場合、縦断勾配が 3%以内の場合、車道内風速が 2m/s 以上になるように設計する。

1）排煙設備の設置について

当時の設計要領[22]によると換気方式別の適用延長は次のようになっている。

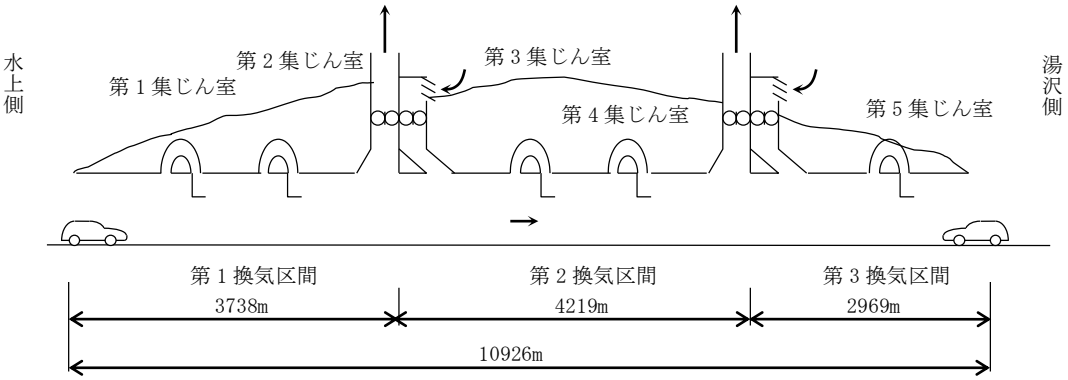
表 ３７　各換気方式の適用延長

換気方式 ＼ トンネル延長(km)			0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
一方向交通トンネル	縦流換気方式	ジェットファン式		■	■	■			
		サッカルド式							
		立坑送排気式				■	■	■	■
	半横流換気式				■	■	■		
	横流換気式					■	■	■	■
対面交通トンネル	縦流換気方式	ジェットファン式		■					
		サッカルド式							
		集中排気式		■	■	■			
	半横流換気式				■	■	■		
	横流換気式					■	■	■	■

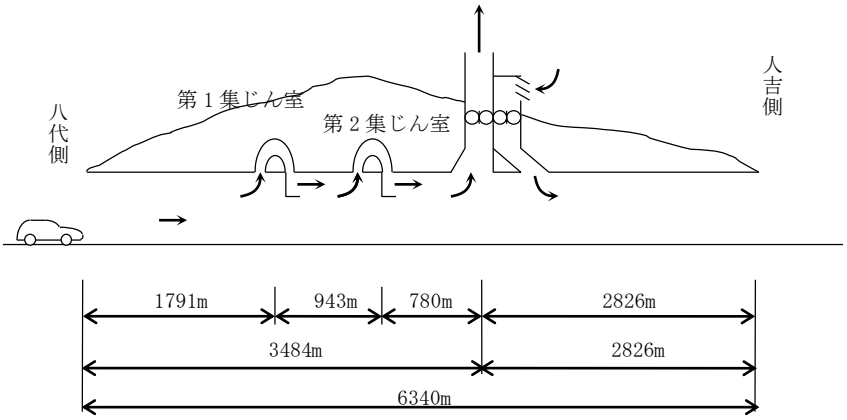
この表 37 によると、従来 1km 程度が一方通行の縦流換気方式の適用範囲であったものが 2km と適用延長が伸びてきていることが認められる。一方、半横流式の場合の適用延長は 1.5km～3km であるが、この方式の特徴として排煙機能をもたせることができることがあげられる。このことから半横流の適用範囲となる 1.5km 以上については、換気方式としてのレベルを合わせるために縦流換気方式に排煙設備を設置している事が認められる。実際には、当時の 1.5km のトンネルには換気用としてジェットファンは設置されている。

また、縦流換気方式は、煙の処理について考慮されており 2000 年直前までは換気区間を関越トンネルの１換気区間間隔以下の約４km程度計画している。従って、煙の広がる区間は最大４ｋｍとして換気坑を計画していた。以下その例を示す。

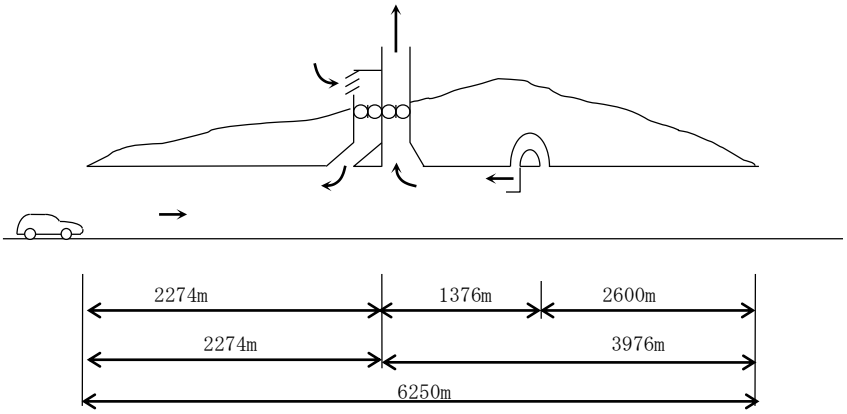
①関越トンネルⅠ期線（1985 年供用：関越自動車道）



②肥後トンネルⅠ期線（1989 年供用：九州自動車道）



③加久藤トンネルⅠ期線（1995 年：九州自動車道）



肥後トンネル、加久藤トンネルは、電気集塵機のみの計画で可能であったが、上記理由から中間に送排気装置を設置した。2000 年まで事故の発生もなく支障も生じていないことから現在では、延長 5932m の袴腰トンネル（集塵式）1 換気区間で計画されている。

排煙設備と避難設備を整理したものを表 38 に示す。

表 ３８　換気（排煙）設備と避難施設

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th colspan="2">都市間高速道路トンネル</th><th rowspan="2">都市内高速道路トンネル</th><th rowspan="2">備考</th></tr>
<tr><th>換気（排煙）設備</th><th>避難施設</th></tr>
<tr><td>1960年代</td><td>換気設備で対応
（横流、送気半横流式の採用）</td><td>日本坂トンネル避難連絡坑3ヵ所
（施工上の理由から掘削されたので当初閉鎖されていた）</td><td rowspan="8">重交通故換気（排煙）
設備と避難施設は、別々に計画されていた

避難口→避難階段（地上へ）
（開削トンネル）</td><td></td></tr>
<tr><td>1970年代</td><td>（排煙機能）
大排煙口方式送気半横流の開発</td><td></td><td>1975年　網掛トンネル供用
（大排煙口）
1979年　日本坂トンネル火災</td></tr>
<tr><td rowspan="5">1980年代</td><td>長大トンネル縦流化</td><td>避難通路設置</td><td rowspan="4">1981年　笹谷トンネル供用
（大排煙口）
1985年　関越トンネル（Ｉ期線）供用</td></tr>
<tr><td colspan="2">↓
避難通路付縦流方式と大排煙口付送気半横流式の比較
↓</td></tr>
<tr><td>縦流換気方式
（2m/s程度の縦流風で煙が遡上しないことを確認）</td><td>トンネル延長1500m程度以上のトンネルに排煙設備設置
設計要領第三集（S60）</td></tr>
<tr><td colspan="2">延長3km以上　避難通路→暫定対面
避難連絡坑→350m間隔
延長750m以上　避難通路→反対車線（一方通行）
避難連絡坑→750m間隔</td></tr>
<tr><td>2000年代</td><td colspan="2">低風速化制御（対面通行）</td><td>三次元火災シミュレーション結果をもとに避難口間隔を決めている。
横流：排煙＋零化制御
縦流：零化制御

路面下部、独立避難通路：地上へ
反対車線：地上又は坑口
（シールドトンネル）</td><td>モンブラントンネル、タウェルントンネル火災事故</td></tr>
</table>

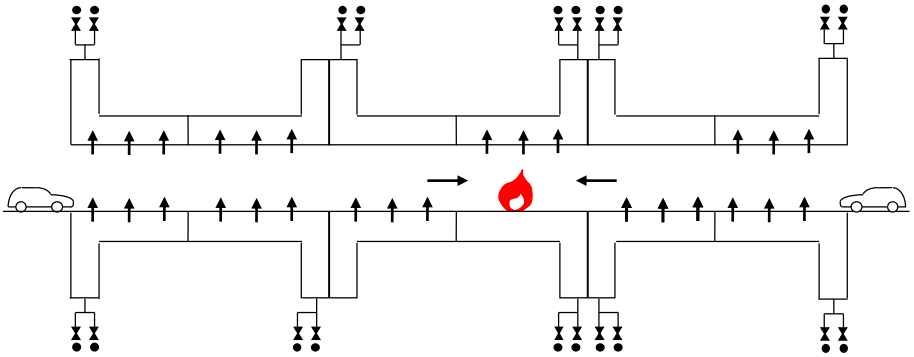
（４）換気機の運用方法

トンネル内火災時の効果的な運用方法は、換気方式、交通方式等により実験や実際の火災時の運用に対する見直し等によって変わってきている。

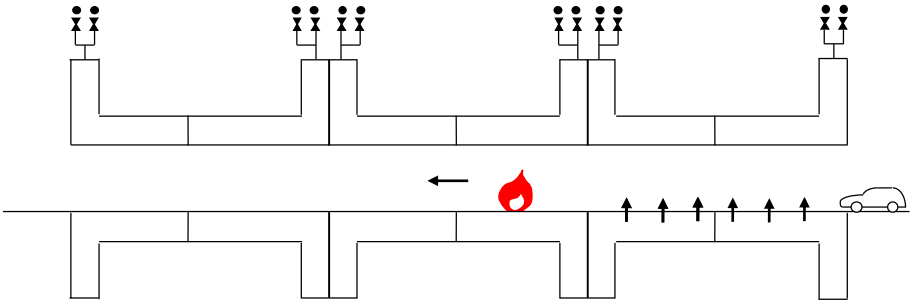
１）横流及び送気半横流式

横流式を採用した関門トンネルは対面通行で供用されていることもあり、火災時の換気運転は火点の排気ダクトを排気運転とし、隣接区間を送気とすることで煙を排気区間に収める方法を採用してきた。その後、実験等を行い火点区間の排気、前後の送気は変わらないのでその他の区間の送排気を運転することでそのエアーカーテン作用を利用し、自然風に対処する方向に変わってきている。一方通行の都市間高速道路トンネルの横流式の恵那山、笹子トンネルは、日本坂トンネル火災事故以降前方への排煙方法を採用してきた。

対面通行の例



一方通行の例



なお、都市内高速道路トンネルの横流式は渋滞を想定していることもあり対面通行と同様の運転を行っている。送気半横流式の場合、実験や理論をもとに基本的には排気運転を行うことが決められダクト系により火災地点ごとの換気運転が提案されている。(1963 年、1974 年)

1974 年には、排煙効果を上げるために都市間高速道路トンネルで大排煙口方式が提案され 2 本のトンネル（網掛、笹谷トンネル）で採用されている。この方法は、100m 間隔で設置される大排煙口すべてを利用し通常時の換気を行い、火災時には火災付近の排煙口のみを全開として他の排煙口を閉鎖することにより排煙効率をあげ避難環境及び消火救急活動を容易にする方法である。この 2 本のトンネルは、対面通行トンネルであったが、Ⅱ期線が施工され一方通行となるとともに天井板が撤去され縦流方式となっている。なお、大排煙口が設置されている期間にトンネルでの火災事故は発生していない。

一方通行の送気半横流方式での火災時の運用方式は、1979 年に発生した日本坂トンネルの火災事故を受けて変わってきている。このときは送風機を逆転し排煙運転を行ったが、排煙することにより火災が拡大し多くの車両を焼失した。この結果を受け、一方通行トンネルでは送気半横流式はもとより横流式おいても進行方に縦流風を流す運用となった。

２）縦流式

縦流換気方式における排煙設備は、煙のコントロール用として利用されており、その規模は、都市間高速道路トンネルでは、停止車両の抵抗と自然風 2.5m/s 分に相当する圧力を抵抗として見込み、その上で排煙風速 2m/s を確保できるように計画されている。都市内高速道路トンネルでは、火災発生から火災規模が大きくならない範囲の 240 秒以下（表 56 発熱速度参照）で風速零化を行えることを条件に決めている。その運用方法を表 39 に示す。

表 ３９　縦流換気方式と換気機の運用方法

対象路線	交通方式	延長	換気機の運用	備考
都市間高速道路トンネル	対面通行	3 km未満	換気機停止	換気用として利用している場合
		3 km以上	ジェットファンを利用した低風速制御	
	一方通行	1.5 km未満	－	－
		1.5 km以上	火災覚知後排煙設備（ジェットファン）運転	風速制御無し 縦流風 2m/s 程度以上を確保（縦断勾配 3%以下） (1.5 km以上排煙設備設置)
都市内高速道路トンネル	一方通行	－	風速零化制御	現在 5Km 以上（実績） 排煙専用設備設置
一般道路トンネル	対面通行	3 km未満	換気機停止	換気用として利用している場合
		3 km以上	ジェットファンを利用した低風速制御	一部避難通路の設置されるトンネル

一方通行の場合、2m/s 程度の縦流風を下流側に流すことにより、下流側の煙を乱さず上流側の煙の遡上を抑制し道路利用者を避難連絡坑から安全空間へ避難させている。

なお、都市内の長大トンネルは、交通の先詰まりを考慮し火災覚知と同時にトンネル内の風速零化制御を行い、煙を天井部に留めその間に安全空間に避難させている。

６－２　一方通行縦流換気方式の火災時の課題

ここでは、これから採用されて行く縦流換気方式の一方通行トンネルを取り上げ、その課題を抽出する。縦流換気方式は、換気機の運転が直接車道に影響するので今まで注目されていなかった車道内の圧力状況を把握することにより避難扉の開閉や開放された場合に避難環境に与える影響を検討する。避難扉は、容易に開閉できる機能や強度に対する圧力の標準仕様が決められている。また、通常発災側の影響を避けるために避難連絡坑の扉は 2 枚構成であり、両方同時開放されることは考えられていないが、避難連絡坑の断面が標準化されており（図 24 参照）この断面では滞留スペースがあまり確保できないので、避難者数が多い場合には同時に解放される可能性がある。この他、施工条件によっては扉が 1 枚の場合も生じてきている。

このように、発災側と避難通路側が解放された場合の影響を把握しておく必要がある。この他、2012 年に発生した一方通行の縦流換気方式を採用する雪山トンネル（台湾：L=12.9km）の火災事故では、交通事故により押し出されたバスの後方で火災が起こり多数の傷害者を出している。このように火災発生地点より前方に停止車両の有る場合の状況を把握しておく必要がある。これらの状況を把握し、課題を抽出する。

①避難扉の開閉

②隣接する安全空間への煙の流入

③火災事故時の排煙設備の運用方法

①、②については、火災時のシナリオをもとに当該トンネルと安全空間との圧力差を算定してその影響を把握する。③については、現状の排煙設備を運転した場合の下流側の煙の状況を把握する。

６－２－１　車道内風速及び車道内圧力

一方通行トンネルで、事故が発生しその場所で車両が停止すると圧力が上昇する。また、車道に設置されるジェットファンを運転することにより圧力が変動する。この圧力変動を把握するために柳、戸村、水野らの報告[42]を参考に一次元シミュレーションを行った。

（１）空気力学モデル

単区間の運動方程式は(1)式のように与えられる。

$$m\frac{dV_{r\alpha}}{dt} = f + A_r\left(p_\alpha - p_\beta\right) \qquad (1)$$

$$f \equiv F_r + F_t + F_j + F_e$$

このとき単区間に働く換気力は管路損失力、交通換気力、ジェットファン換気力、入口抵抗力である。

数区間の運動方程式は、図 29 のように各換気区間の接続を、リンク・ノードを用いたグラフ表現で表し、単区間の運動方程式をグラフ表現に合わせた接続行列を用いて連立させ解くと(2)式を得る。

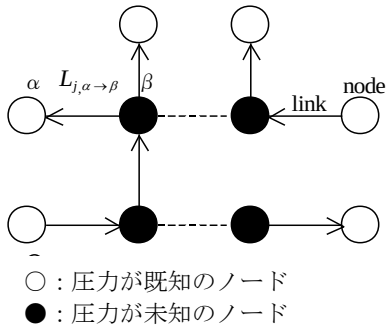


図 ２９　各換気区間の接続を示すリンク・ノード表現

$$m\frac{dV_r}{dt} = f(V_r) + A_r S_2 p_{out} + A_r S_1\left(-\psi_{in}^{-1}\psi_{out}p_{out} - \psi_{in}^{-1}\Gamma f(V_r) - \psi_{in}^{-1}S_3^T A_r \frac{d\Delta Vr}{dt}\right) \quad (2)$$

$$\psi_{in} \equiv S_1^T m^{-1} A_r^2 S_1 \qquad \psi_{out} \equiv S_1^T m^{-1} A_r^2 S_2$$

$$\Gamma \equiv S_1^T m^{-1} A_r$$

ただし

A_r　：トンネル断面（m^2）
F_r　：壁面摩擦損失力（N）
F_t　：交通換気力　　（N）
F_e　：入口損失力　　（N）
F_j　：ジェットファン昇圧力（N）
λ　：壁面摩擦損失係数
L　：link 延長　（m）
S_1　：圧力が未知のノードを示す接続行列
S_2　：圧力が既知のノードを示す接続行列
m　：空気の質量　（kg）
V_r　：代表縦流換気流速　（m/s）
ΔV_r：link の始点と終点の速度差（m/s）
P_{in}　：トンネル内 node の圧力　（Pa）
P_{out}　：トンネル出入り口 node の圧力　（Pa）
ρ　：空気の密度　（kg/m^3）
t　：時間　（s）
α　：入り口
β　：出口
i　：リンク番号
j　：ノード番号

なお、非定常計算を行うにあたって、交通の流れは車両に追従機能や最大加速度（加速・減速）を設定する等の機能をもたせたミクロ交通量モデルを採用した。

（２）対象換気方式と火災時のシナリオ

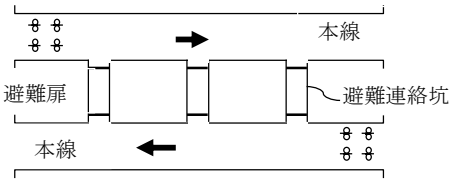
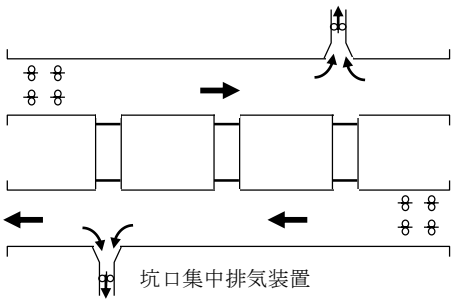
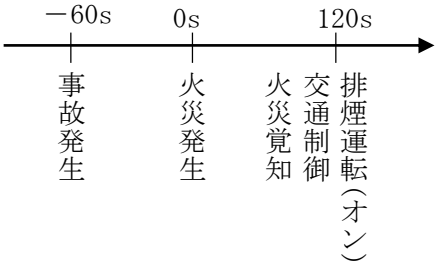
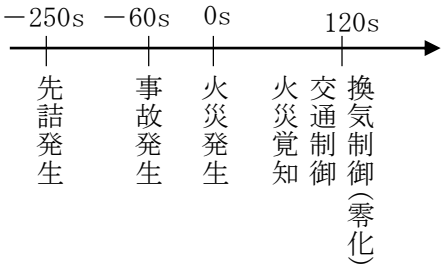
都市間及び都市内高速道路トンネルを対象とするが、最大延長は、自然換気の対象範囲の恵那山トンネル並とした。換気方式は、今後採用が想定される次の二方式とした。

① 都市間高速道路トンネル：ジェットファン縦流式（排煙設備）

② 都市内高速道路トンネル：坑口集中排気縦式（ジェットファン併用）

計画条件を表 40 に示す。

表 ４０　対象換気方式と火災時のシナリオ

	都市間高速道路トンネル	都市内高速道路トンネル
換気方式	ジェットファン縦流式（排煙設備）  	坑口集中排気縦流式 
火災時のシナリオ	 	
検討条件	トンネル延長　2、4、6、8 km トンネル断面　60m^2 トンネル代表寸法　7.9m 交通量　2000、2300、2500 台/h 大型車混入率　20、25、30% 走行速度　80 km/h	トンネル延長　4、6、8 km トンネル断面　60m^2 トンネル代表寸法　7.9m 交通量　3070、2920、2790 台/h 大型車混入率　20、25、30% 走行速度　43 km/h
備考	・交通量は、設計交通容量より低めの自由走行（設計速度での走行）範囲とした。 ・最急勾配を 3%とした	・交通量は、設計交通容量とした。 ・設計速度 60 km/h とし、走行速度と設計速度と交通容量の関係で低下させた。 ・最急勾配を 4%までとした。

（３）換気設備規模

１）都市間高速道路トンネルの換気設備規模

都市間高速道路換気設備規模の排煙設備を対象に検討する。排煙設備は、自然風 2.5m/s に相当する抵抗分を見込んで 2m/s 程度の縦流風が流れる規模とする。また、排煙設備は、口径 1250、高風速用を対象とする。ジェットファン台数は、次のように求めた。

$$Z=\frac{\Delta Pr+\Delta P_T+\Delta P_{MTW}}{\Delta Pj}$$

$$\Delta Pr=(1+\zeta in+\lambda\frac{L}{D}\cdot\frac{\rho}{2}Ur^2)$$

$$\Delta P_{MTW}=(1+\zeta in+\lambda\frac{L}{D}\cdot\frac{\rho}{2}Un^2)$$

$$\Delta P_T=\frac{Am}{Ar}\cdot n\cdot\frac{\rho}{2}\cdot Ur^2$$

ただし

Ｚ：ジェットファン台数

ΔP_r:入り口及び壁面損失（Pa）

ΔP_{MTW}:自然風による圧力差(Pa)

ΔP_T:停止車両による抵抗値(Pa)

ΔP_j:ジェットファン昇圧力(Pa)

Dr:トンネル断面積(m^2)

Dr:トンネル代表寸法（m）

ζin：入り口損失係数

λ：壁面摩擦損失係数

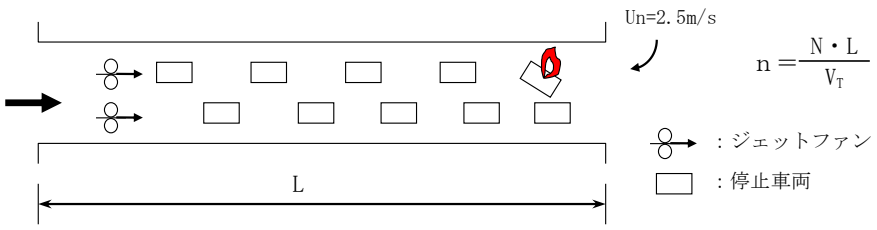
Am：車両全面等価抵抗面積（m^2）

Ur:車道内風速（m/ｓ）

Un:自然風速（m/ｓ）

n:停止車両台数（台）

表 ４１　都市間高速道路トンネル排煙設備規模

概要												
L	2km			4km			6km			8km		
N(台/h)	2000			2000			2000			2000		
γ_L(%)	20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
JF台数(台)	2	2	2	4	4	4	5	5	5	7	7	7
Ur(m/s)	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3	2.0	2.0	2.0	2.2	2.2	2.1
N(台/h)	2000	2300	2500	2000	2300	2500	2000	2300	2500	2000	2300	2500
γ_L(%)	20			20			20			20		
JF台数(台)	2	2	2	4	4	4	5	5	6	7	7	7
Ur(m/s)	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3	2.0	2.0	2.4	2.1	2.1	2.1

２）都市内高速道路トンネル換気設備

都市内トンネルの場合、坑口集中排気式を採用してその換気設備規模を算定する。算定にあたってのトンネル縦断勾配は、以下のように想定した。

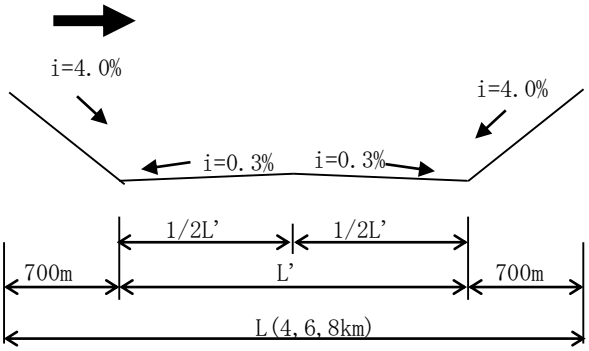


図 ３０　想定トンネル縦断勾配

また交通量は、設計交通容量とした。設計交通容量は、大型車の補正を行うことにより求められる。

設計交通容量＝基本交通容量×大型車補正×計画水準による低減率

一方通行時の基本交通量は、4400pcu/h、大型車の補正は大型車混入率と縦断勾配により決まる値であり、計画水準による低減率は、道路構造規格第二種の道路想定し 0.9 を採用した。上記縦断勾配と大型車の関係から設計交通容量は、以下のように求める。

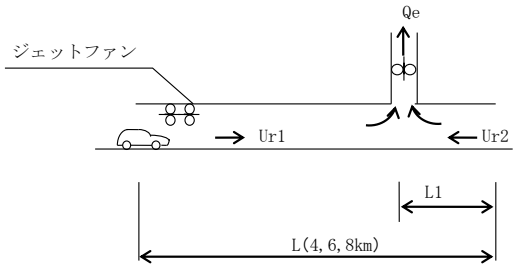
表 ４２　設計交通容量

大型車混入率（%）	設計交通容量（台/h）	備考
20	3070	4%勾配：700m
25	2020	
30	2790	

走行速度は、設計速度 60 km/h として交通容量による低減を考慮して 43 km/h として扱う。

これらの条件をもとに換気設備規模を算定したものを表 41 に示す。なお排気口は、4 kmで 100m、6km で 200m、8 kmで 300m とした。

表 ４３　都市内トンネル換気設備規模

概要									
γ L(%)	20			25			30		
N(台/h)	3070			2920			2790		
L	4km	6km	8km	4km	6km	8km	4km	6km	8km
L1	100m	200m	300m	100m	200m	300m	100m	200m	300m
Qe(㎥/s)	280	370	460	290	380	480	300	390	510
JF台数(台)	8	2	13	8	2	17	8	2	22
JF運転方向	←	←	→	←	←	→	←	←	→
Ur1(m/s)	4.1	5.6	6.9	4.4	5.7	7.2	4.5	5.9	7.7
Ur2(m/s)	0.5	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8	0.5	0.6	0.9

上記の結果からトンネル延長６㎞までは、トンネル内に流れる流量が必要風量を超えるためにジェットファンを逆転する。トンネル延長 8km の場合は、不足するのでジェットファンを応援する方向に運転する。

（４）検討内容及び検討方針

トンネル延長及び交通条件が車道内の圧力にどのような影響があるかを検討するとともに、火災地点を変化させ課題を抽出する。

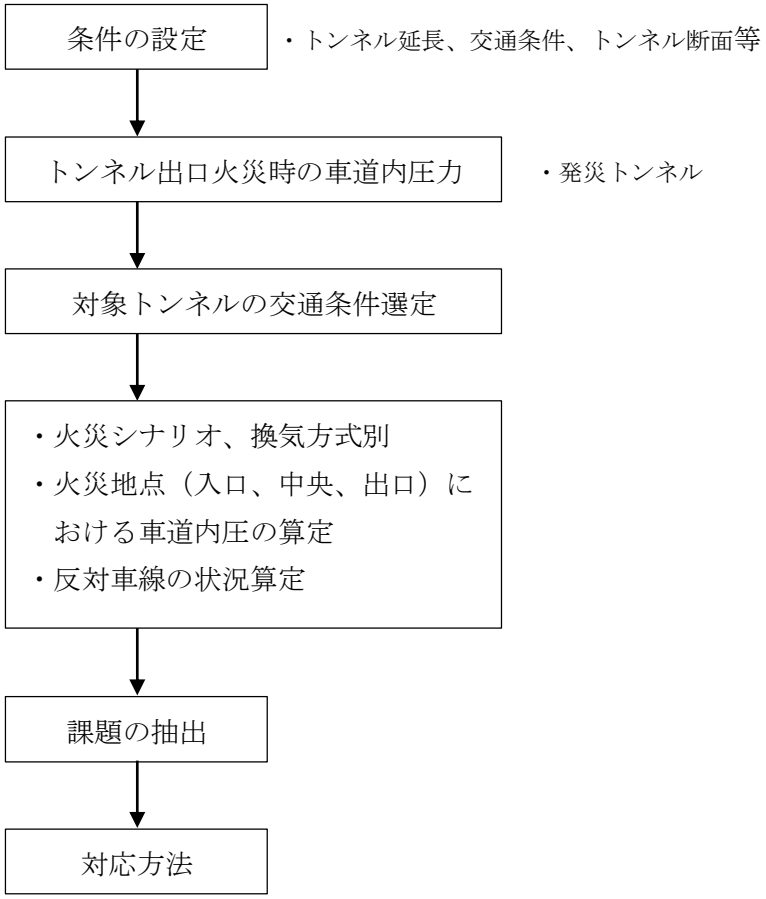


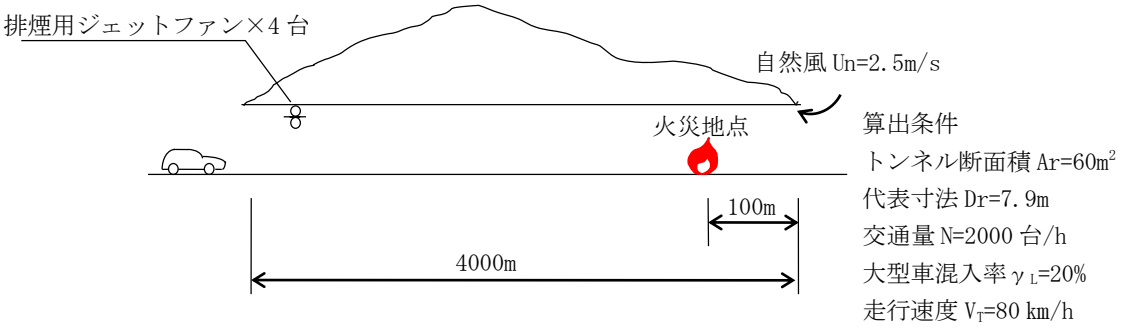
図 ３１　検討フロー図

６－２－２　シミュレーション結果

（１）　都市間高速道路トンネルの火災発生地点と車道内圧

１）トンネル内事故発生と車道内圧力

トンネル内で事故が発生し、そこで車両が詰まることにより車道内の圧力は上昇する。前記（表 40）した都市間高速道路トンネルのシナリオのもとにトンネル延長 4km、出口坑口から 100m の位置で火災が生じた条件で経過時間ごとの車道内圧力を算定したものを次に示す。



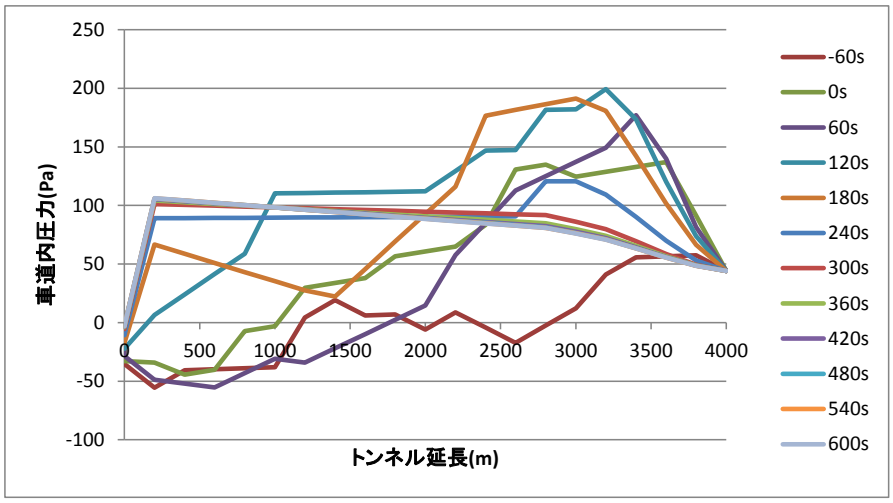


図　３２　時間経過と車道内圧

① 事故発生前の車道内圧は、出口に向かって上昇し自然風による抵抗値にすりつく。（事故発生直後）（-60 秒）

② 故発生 120 秒後に交通制御（入口閉鎖）及び換気機運転が行われる。

③ 時間経過とともに停止位置が後方に移動し最大圧力点も移動する。

④ 300 秒後には、ジェットファンの昇圧力のみとなる。（坑口閉鎖により 300 秒後移動する車両なし）

2）火災地点ごとの車道内圧（トンネル延長４km）

都市間高速道路トンネル４kmを対象に火災地点を入口坑口 100、1000、2000、3000m 及び 3900m 地点とした場合の車道内圧力値を時間ごとに示した。

表　４４　火災発生地点と車道内圧

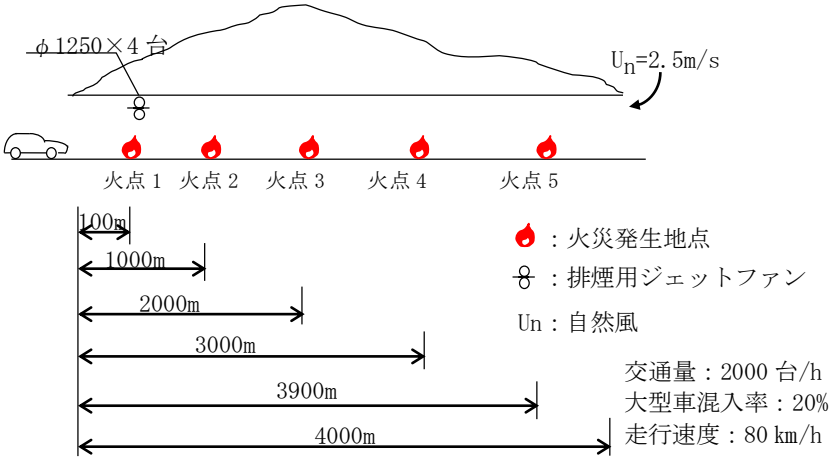
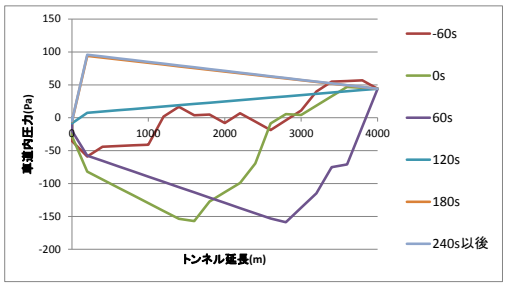
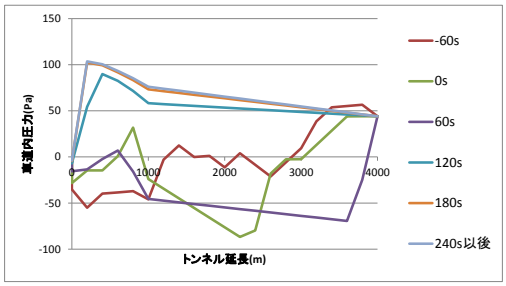
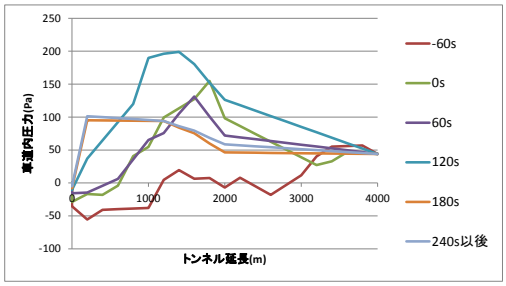
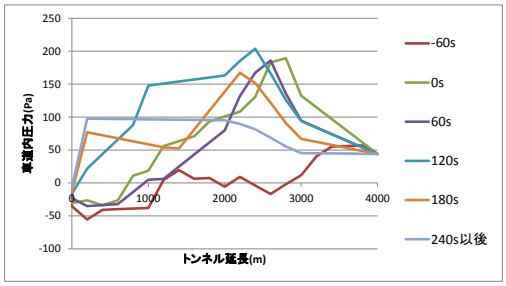
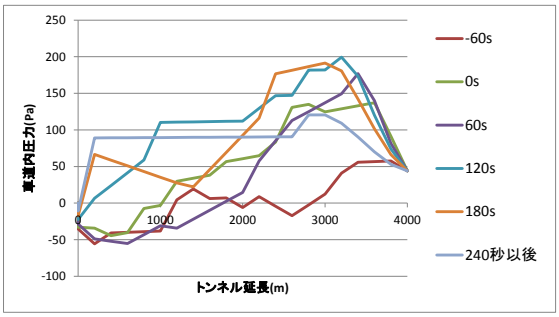
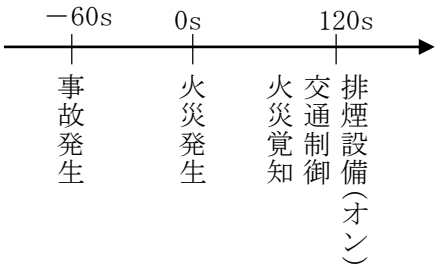
<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="6">シミュレーション結果</td><td>火点１（100m）</td><td>火点２（1000m）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>火点３（2000m）</td><td>火点４（3000m）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>火点５（3900m）</td><td>シナリオ</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

表 44 に示すシミュレーション結果は、火災発生地点ごと時間ごとの車道内圧力（静圧）分布を示したものである。この結果から次のことがいえる。

① トンネル入口火災の場合、火災地点前方の車両はそのまま出口側に向かうため圧力は大きく上昇せず火災覚知とともに排煙運転が行われるので、そのジェットファンの昇圧力に支配される。

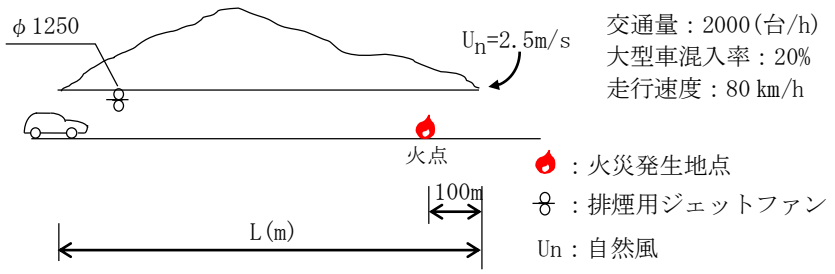
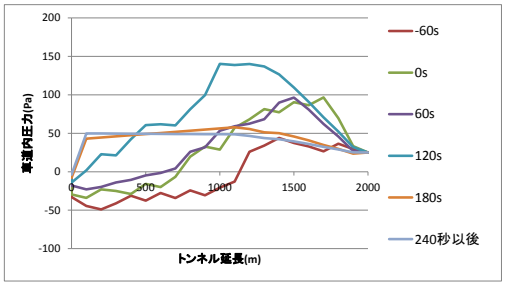
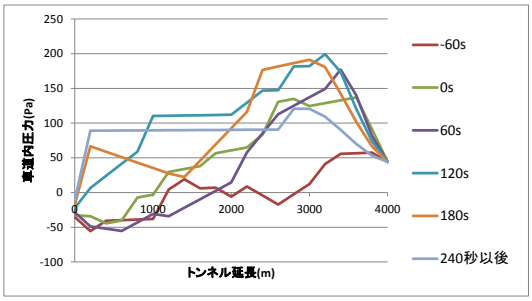
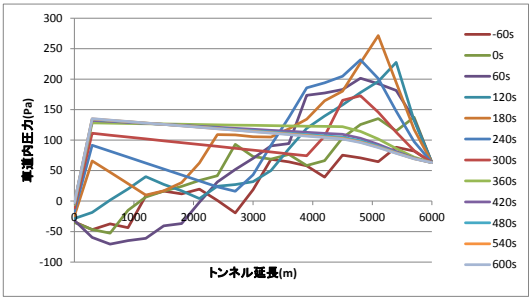
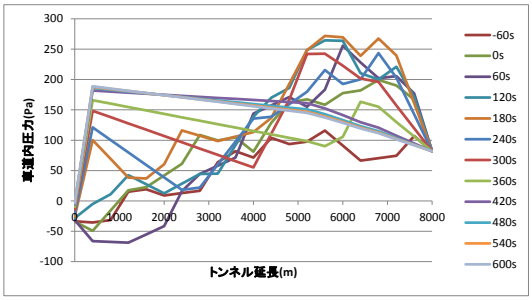
② 火災地点がトンネル中央付近から出口区間の場合、出口側に近い程圧力は上昇し最大圧力は 200Pa 程度となる。また、火災地点が出口側となる程影響時間は長くなる。

③ 240 秒以降は、車両の移動が少なくなりジェットファンの昇圧力に支配される。

３）トンネル延長と車道内圧力

前記結果をもとに圧力上昇の大きい出口火災を対象に圧力の影響を検討した。

表 ４５　トンネル延長と出口火災時の車道内圧力の影響

<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">シミュレーション結果</td><td>L＝2 km（排煙設備：JF1250×2 台）</td><td>L＝4 km（排煙設備：JF1250×4 台）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>L＝6 km（排煙設備：JF1250×5 台）</td><td>L＝8 km（排煙設備：JF1250×7 台）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

トンネル延長の影響は表 45 及び図 33 に示すように長くなるほど大きくなる。

	最大圧力(Pa)	位置(m)
2km	140	1300
4km	205	3000
6km	285	4800
8km	320	5600

交通量2000台/h
大型車混入率25%
走行速度80km/h

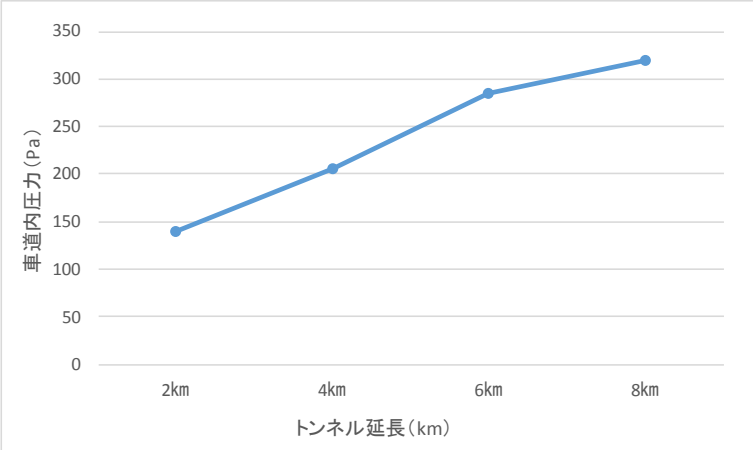


図　３３トンネル延長と最大圧力

４）交通条件の影響

交通条件の影響について、トンネル延長 4、6、8 kmを対象としての出口から 100m 地点の火災を想定し検討した結果を表 46 に示す。

表　４６　交通条件の影響

		2000(台/h)			2300(台/h)	2500(台/h)
大型車混入率(%)		20	25	30	20	20
2 km	最大値 (Pa)	140	140	160	150	155
	坑口からの距離(m)	(1300)	(1300)	(1300)	(1200)	(1300)
4 km	最大値 (Pa)	200	205	240	245	290
	坑口からの距離(m)	(3200)	(3000)	(3000)	(3000)	(3000)
6 km	最大値 (Pa)	300	285	305	315	410
	坑口からの距離(m)	(4800)	(4800)	(5100)	(4800)	(4800)
8 km	最大値 (Pa)	270	320	375	405	460
	坑口からの距離(m)	(6000)	(5600)	(5600)	(5600)	(4800)

(　) ほぼその位置（幅がある）

この結果らから大型車台数が増加すると圧力は増加し、交通量が増えても増加の傾向にある事が認められる。また、最大圧力は、坑口閉鎖後の車両の移動する時間に影響され 2 km程度のトンネルでは 120 秒、8 km だと 300 秒程度まで続く。

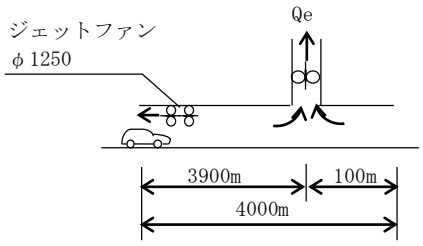
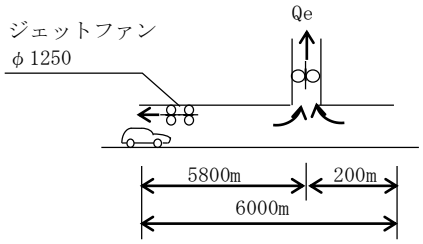
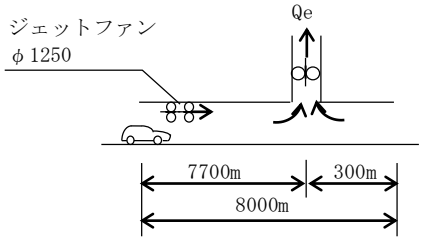
（２）　都市内高速道路トンネルの車道内圧

都市内高速道路トンネルの場合、交通の先詰りを考慮して火災時には風速零化制御を行うことが前提となる。そこで坑口排気縦流式、風速零化を条件として車道内圧力を算定する

１）坑口集中排気縦流式の換気規模

坑口集中排気式はトンネル延長及び交通条件により排気口位置を変えることが効率的な計画となる。ここでは対象トンネルを 4 km、6 km、8 kmとして排気口位置を出口から 100m,200m,300m として表 43 を基に換気系を整理する。

表　４７　坑口集中排気縦流式の換気系

4 km	交通条件	交通量 2920（台/h）：設計交通容量 大型車混入率 25%　走行速度 43 km/h
	換気系	
	設備規模	排気量 Qe＝290m^3/s ジェットファン（高風速）8 台　逆転運転
6 km	交通条件	交通量 2920（台/h）：設計交通容量 大型車混入率 25%　走行速度 43 km/h
	換気系	
	設備規模	排気量 Qe＝380m^3/s ジェットファン（高風速）2 台　逆転運転
8 km	交通条件	交通量 2920（台/h）：設計交通容量 大型車混入率 25%　走行速度 43 km/h
	換気系	
	設備規模	排気量 Qe＝480m^3/s ジェットファン（高風速）17 台　正転運転

トンネル延長 4km の場合、持ち込み風量が大きいのでジェットファン 8 台逆転運転、6km の場合は、2 台のジェットファンの逆転運転により排風量を減少させた計画としている。8km の場合には持ち込み風量が不足するので 17 台のジェットファンの正転運転で空気を持ち込む計画としている。

都市内道路高速トンネルの場合、風速零化が行われるので車道内圧力分布は、都市間高速道路トンネルとは異なる。前記したシナリオ（表 40 参照）をもとに、次に示す条件の基に車道内圧を算定する。

①風速零化は火災の発生から火勢が大きくなる以前の 240 秒までに行う。

②排気装置は、換気制御が始まって（火災発生 120 秒後）60 秒で停止する。

③交通制御は、火災覚知とともに坑口閉鎖を行う。

④零化のためのジェットファンは、煙の拡散を防ぐために火災地点より 1ｋｍ以上離した地点のものを利用する。

２）火災地点ごとの車道内圧力

都市内高速道路トンネルのジェットファンの正転運転を行う 8km 対象に火災地点を入り口坑口より 100、2000、4000m、6000m 及び排気口手前 100m 地点（坑口より 7600ｍ）の火災を想定し車道内圧力を求める。結果を表 48 に示す。

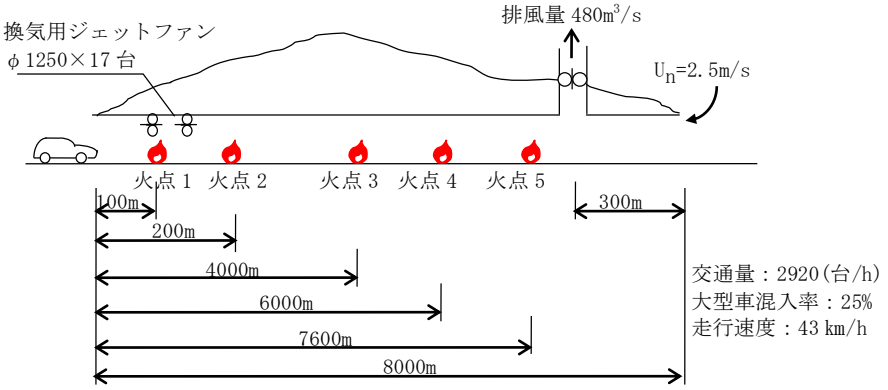
①零化運転することにより都市間高道路トンネルと異なり入り口付近の火災でも出口側のジェットファンの運転付近で圧力が高くなる。

②中央付近から出口側の火災に対しては、当初換気用としてジェットファンを運転しているので入口側の圧力が高くなるのと火点付近で車両が停止する圧力でトンネル全体の圧力が上昇している。

③火災発生 120 秒後に零化運転が始まり、その影響で火災地点とは離れた場所で大きな負圧が生ずる。

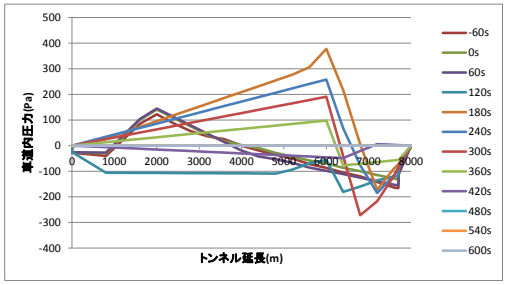
表 ４８　坑口集中排気縦流式の火災地点ごとの車道内圧力

概要

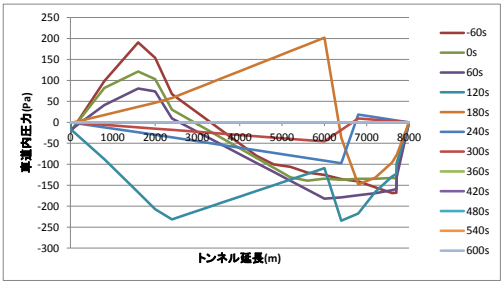


シミュレーション結果

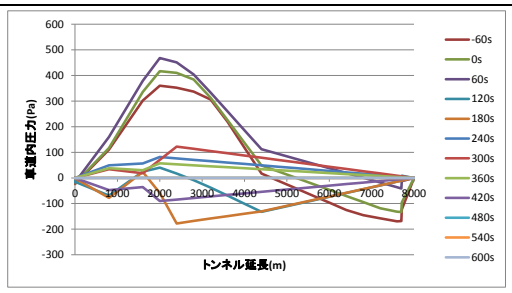
火点 1(100m)（零化用 JF×24 台）



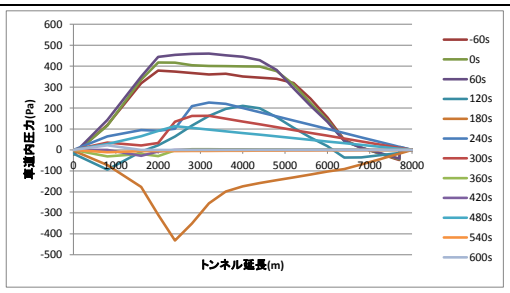
火点 2(2000m)（零化用 JF×12 台）



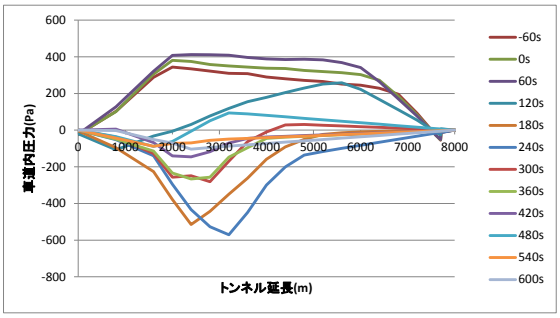
火点 3(4000m)（零化用 JF×13 台）



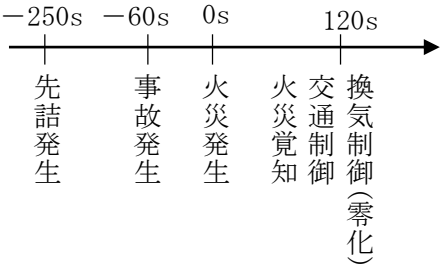
火点 4(6000m)（零化用 JF×30 台）



火点 5(7600m)（零化用 JF×42 台）



シナリオ



３）交通条件の影響

都市内高速道路トンネルの場合、風速零化の影響が出るので交通条件との関係をトンネル延長4 km、6 km、8 kmの出口火災について検討した。結果は、表 49 に示すように圧力のピークが正負どちらにも生ずる。延長が 4～6 kmの範囲であると零化のため入口側のジェットファンを逆転するので、坑口側が大きく負圧となることが分かる。また延長が 8 kmとなると出口側で交通の影響、入口側でジェットファンの影響が大きく出ている。

表 ４９　交通条件の影響（都市内高速道路トンネル）

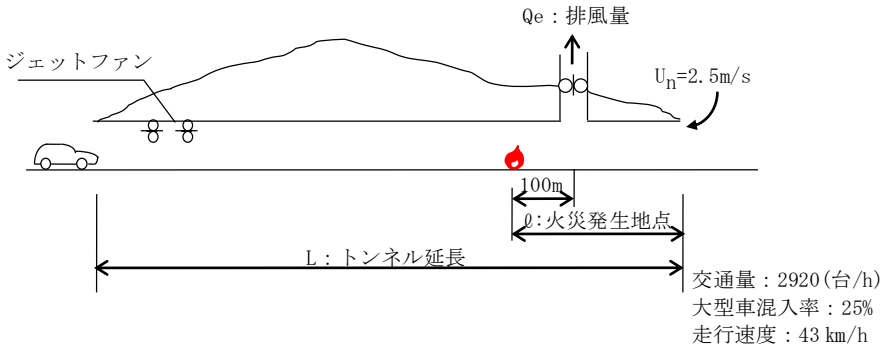
		3070(台/h)		2920(台/h)		2790(台/h)	
大型車混入率(%)		20		25		30	
4 km	最大値（Pa)	-235	100	-200	65	-300	100
	坑口からの距離(m)	800	(800)	(800)	(2200)	(800)	(800)
6 km	最大値（Pa)	-540	140	-500	130	-500	145
	坑口からの距離(m)	(1500)	(3000)	(1500)	(4200)	(1500)	(4500)
8 km	最大値（Pa)	-570	350	-570	400	-670	510
	坑口からの距離(m)	(2400)	(2000)	(3200)	(2000)	(3200)	(2000)

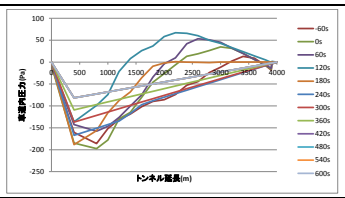
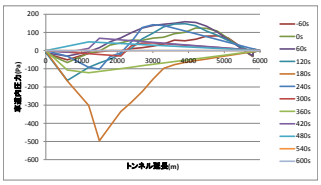
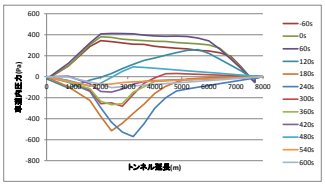
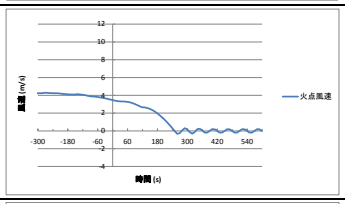
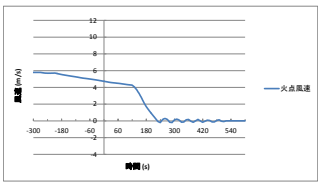
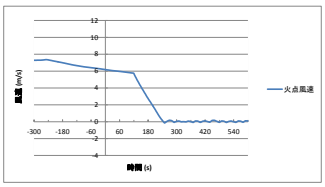
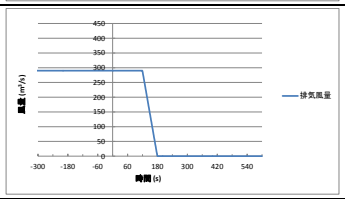
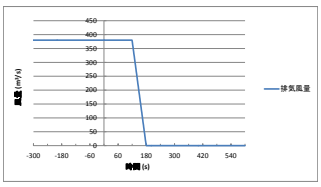
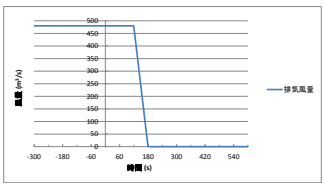
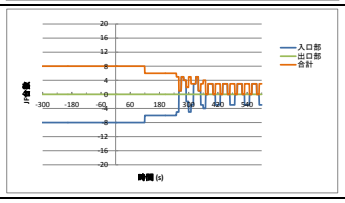
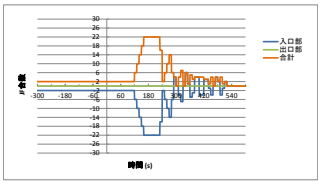
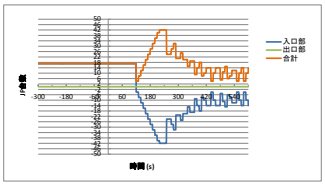
（　）ほぼその位置（幅がある）

4）トンネル延長と出口火災時の車道内圧力の影響

排気口位置から 100m で火災が発生した場合の車道内圧力を算定した。結果は、以下のとおりである。

表 ５０　トンネル延長と出口火災時の車道内圧力の影響



延長	4 km(l=200m)	6 km(l=300m)	8 km(l=400m)
JF 台数	換気用 JF1250×8 台 零化用 JF1250×6 台	換気用 JF1250×2 台 零化用 JF1250×22 台	換気用 JF1250×17 台 零化用 JF1250×42 台
車道内圧			
車道内風速（火点）			
排風機の運転			
ジェットファンの運転			

６－２－３　課題の抽出

トンネル内の火災は、トンネル延長や火災の発生地点により一時的ではあるが、圧力の変動が大きく、避難扉の閉鎖や避難連絡坑と避難通路が開放された場合の影響が考えられる。

（１）避難扉

日本の道路トンネルの避難扉は、引戸を採用しており、その仕様は以下のとおりである。

表　５１　避難扉標準仕様（抜粋）

①扉の表裏の静圧差が 760Pa の状態でも堅牢であるものとする。 ②扉の表裏の静圧差が 290Pa 程度においても容易に開閉できるものとする。 ③人が容易に通行できる大きさ（W1350 ㎜×H2000 ㎜）とする。 ④解放後、任意の設定時間（60 秒±15 秒を標準とする）に、どの位置に停止していても自動的に閉鎖開始する機構を有するものとする。 ⑤扉の開操作力は、98NT 以下（扉表裏静圧差 290Pa 時）を標準とする。

三和シャッター㈱

この仕様から、車道内圧が 290Pa を超える扉は、開閉が困難となることが想定される。従って、表 46 及び表 49 より、都市間高速道路トンネルは 6 ㎞以上、都市内高速道路トンネルは 4 ㎞以上の場合避難扉の開閉に課題が生ずる。特に、都市内高速道路トンネルの場合、同一本線内に避難通路を設けているケースが多く煙の侵入を防ぐために換気設備を設置して圧力をかけている。このような時、正負両方の圧力がかかるので火災地点とは離れているとはいえ扉には更に圧力が掛かることになる。

（２）避難扉開放の影響

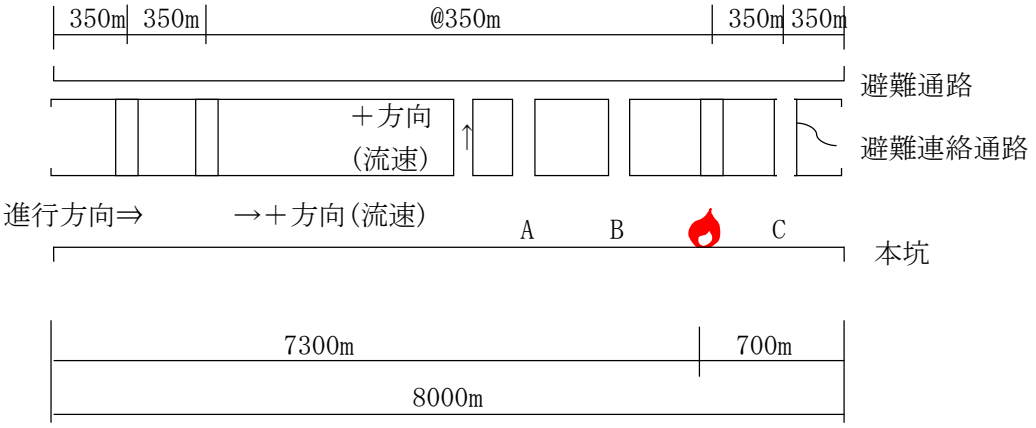
避難方法は、都市間高速道路の場合、一時避難場所として避難連絡坑を利用して避難通路や反対車線となり、都市内トンネルの場合は同一路線内の避難通路を利用する例が多く反対車線を利用する場合もある。

この様な方法に対し、都市間高速道路トンネルの避難通路（反対車線含む）は、大気に開放されており、都市内高速道路トンネルの避難通路は、反対車線を利用する場合を除いて換気（避難通路換気）が行われている。発災トンネルと避難通路を接続する避難連絡坑には、避難扉が 2 ヵ所設置されており、開けた扉は、自動的に閉鎖する機能が付加されており（避難扉仕様参照）、両方が同時に解放されることはないとしている。しかし、避難通路の断面は、それほど大きくなく避難者が多いと一時滞留場所として利用が難しいと考えられ、立地条件や施工条件から避難連絡坑の長さが取れなくて 1 枚扉の例も生じてきている。このように、避難通路が解放されることも有り得るので開放されたことを想定し、その影響及を検討する。トンネル延長 8 ㎞を例に、出口側火災に対する影響を、一次シミュレーションをもとに検討した。

1）条件設定

(a) モデルトンネル

シミュレーションモデルは、次のように設定した。



火災地点を挟み A、B、C 避難連絡坑は開放、他は閉鎖

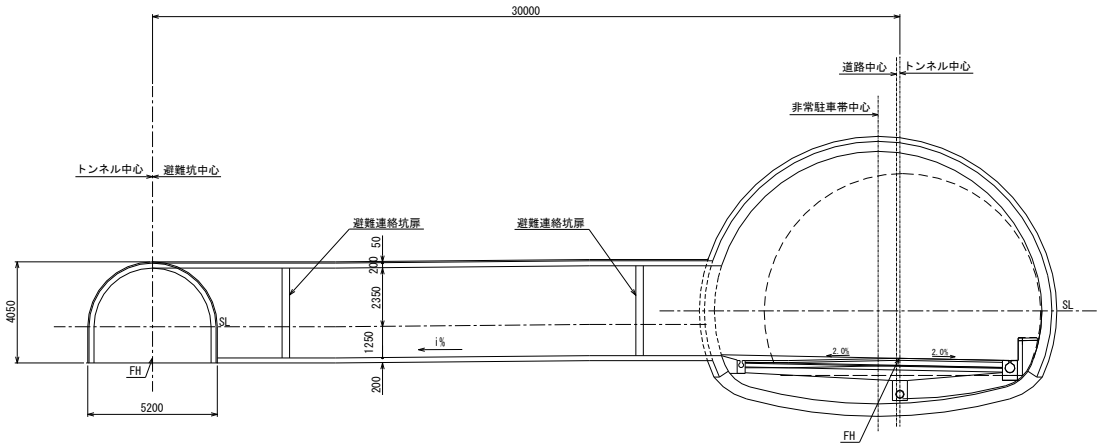


図 ３４　モデルトンネル断面（1）

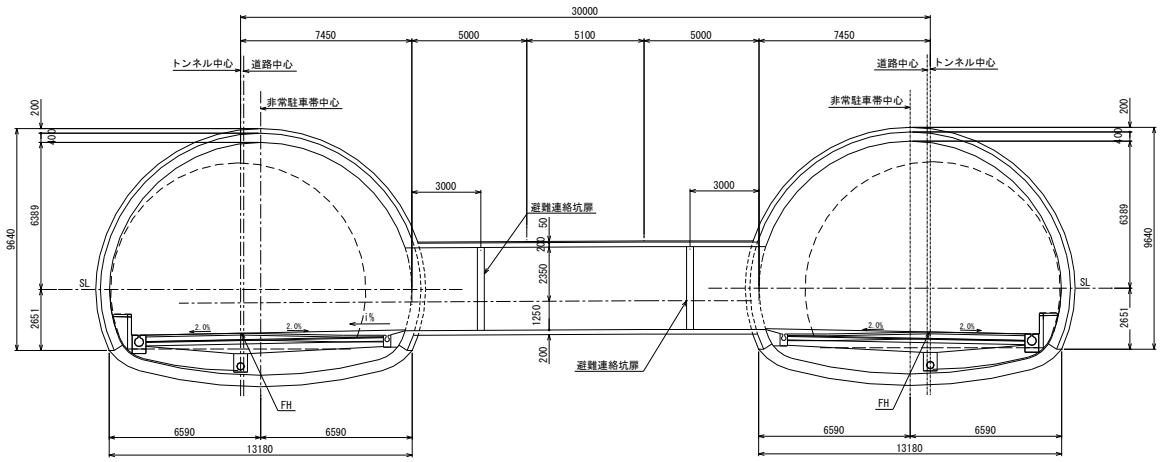


図 ３５　モデルトンネル断面（2）

（ｂ）その他の条件

	都市間高速道路トンネル	都市内高速道路トンネル
トンネル延長	8000m	同左
トンネル断面	Ar＝60m^2、Dr＝7.9m	同左
避難通路断面	Ar＝15.2m^2、Dr＝5.0m	Ar＝60m^2、Dr＝7.9m (避難通路反対車線)
避難連絡通路断面	Ar＝7.2m^2、Dr＝2.2m	同左
扉開口面積	Ar＝2.7m^2(B1.35m×h2.0m)	同左
換気方式	ジェットファン縦流式	坑口集中排気縦流式
交通量	2000（台/h)	2920（台/h)
大型車混入率	20%	25%
走行速度	80km/h	43km/h
避難連絡通路間隔	350m	同左
避難連絡通路の解放箇所	火災地点手前２ヶ所 火災地点後方１ヶ所	同左
自然風	－2.5m/s	0m/s

（ｃ）シナリオ

シナリオは表 40 のとおりとする。

（ｄ）流れの解析

流れの解析は、６－２－１で示したものを行う。

(e) 扉の損失係数

仕切弁の損失係数をもとに算出した。

本坑　　：Ar＝60m^2、Dr＝7.9m

避難坑　　：Ar＝15.2m^2、Dr＝5.0m

避難連絡坑　：Ar＝7.2m^2（扉開口 2.0m×1.35＝2.7m^2）、Dr＝2.2m

扉の損失係数：10.0

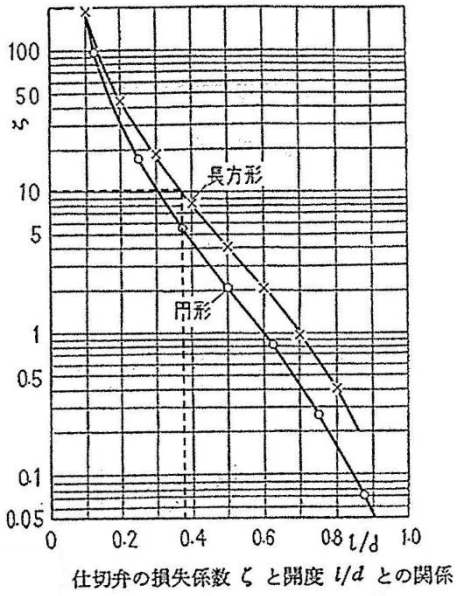


図 ３６　仕切弁の損失係数［41］

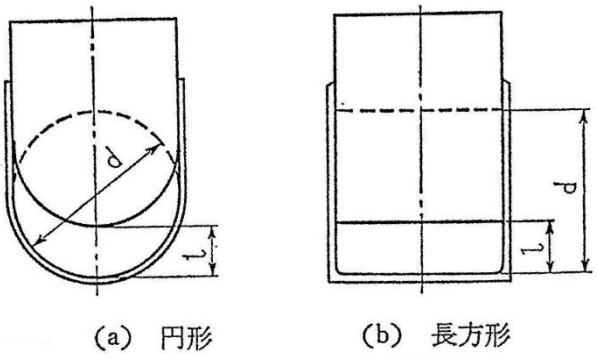


図 ３７　仕切弁の形状［41］

２）シミュレーション結果

都市間高速道路トンネルと都市内高速道路トンネルでは、排煙時のジェットファンの運用方法が異なるので夫々検討を行う。

(a) 都市間高速道路トンネル

都市間高速道路の８kmのトンネルについて避難通路と反対車線（本坑）を対象に連絡坑３ヵ所と連結坑１ヵ所手前側と奥側についてシミュレーションを行ないその結果を表 52、53 に示す。

避難扉が開放された場合を想定すると避難連絡坑には、発災側から 2～5m/s、風量にしても 30～75m^3/s 程度が流れ込むことになる。開放ヵ所が 1 ヵ所の場合、場所によって値が異なることが認められる。これは、前記した圧力分布によるものである。また、避難連絡坑に流れる風速は本線の摩擦抵抗が少ないのでとの接続の場合の方が若干高くなる。

このように延長が長いとかなりの風速で避難通路側（反対車線）への流れが生ずることが認められる。

表 ５２　扉開放時の流れ（避難通路の場合）

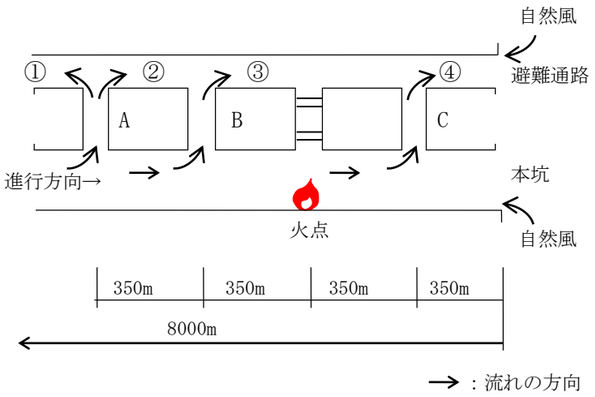
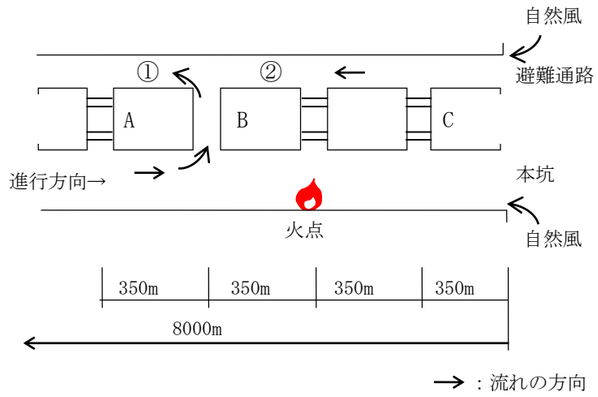
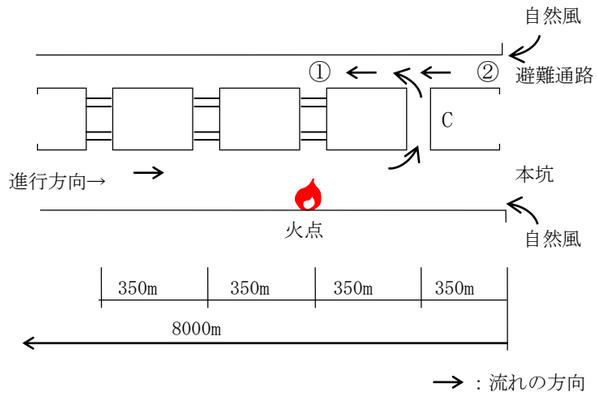
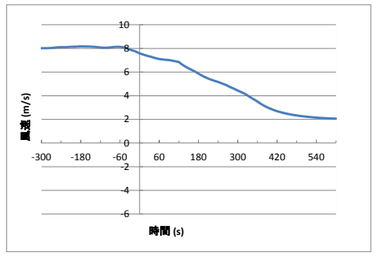
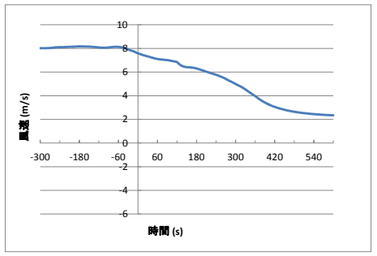
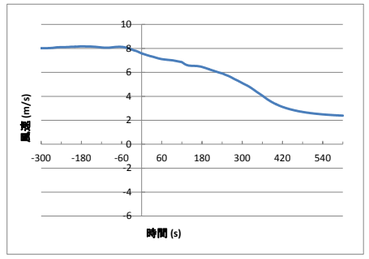
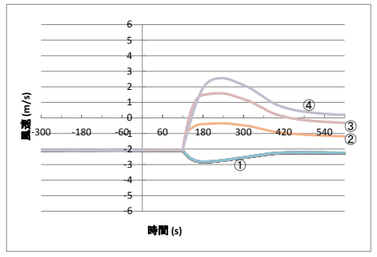
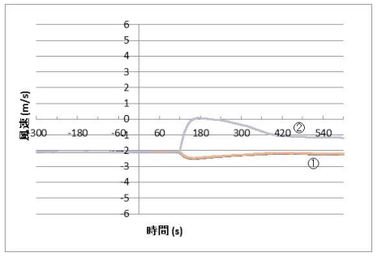
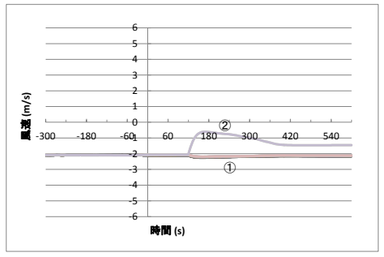
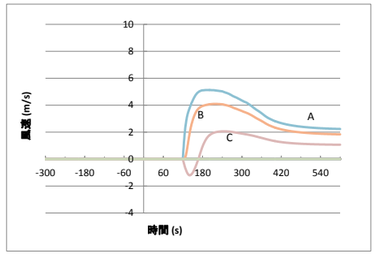
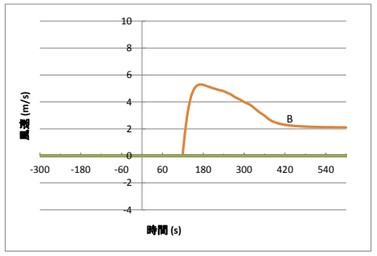
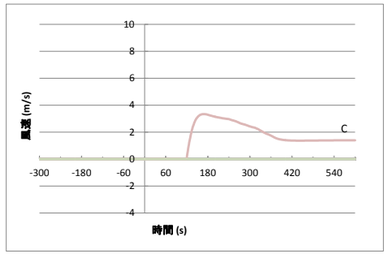
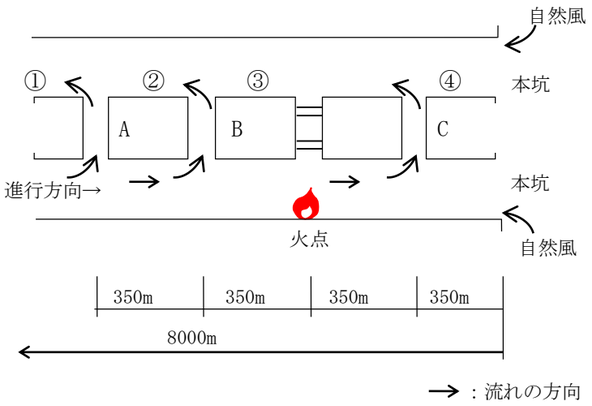
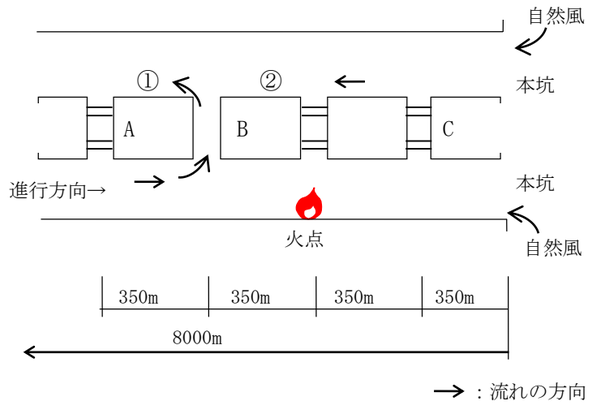
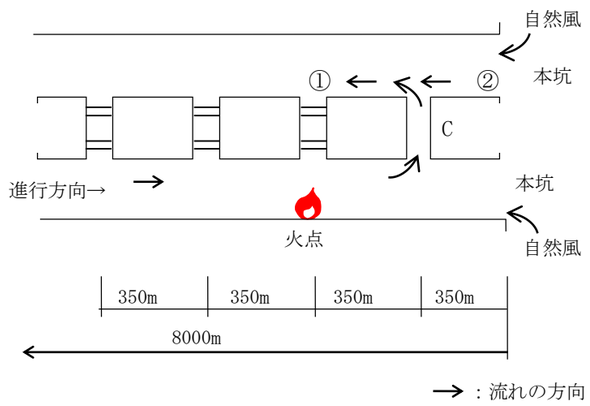
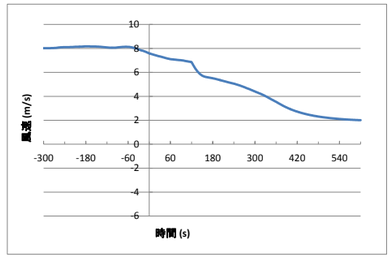
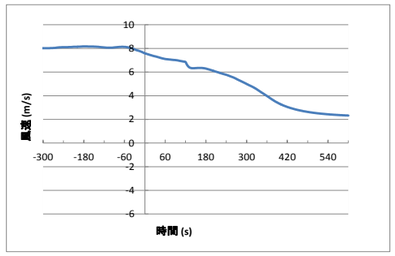
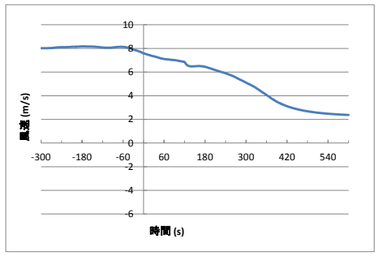
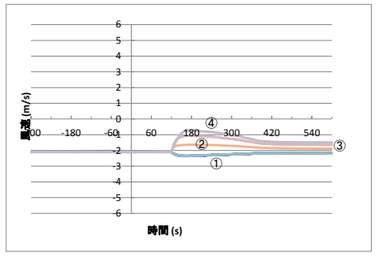
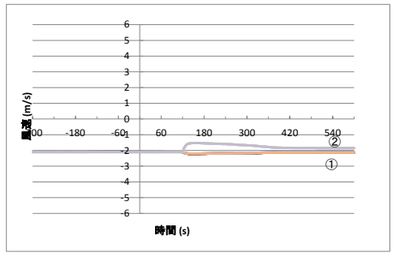
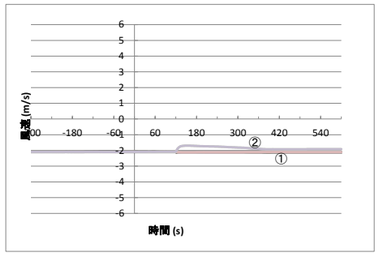
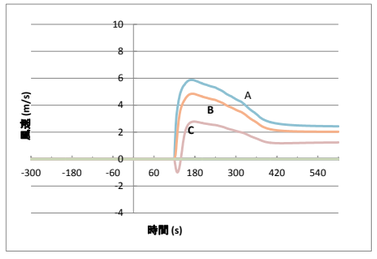
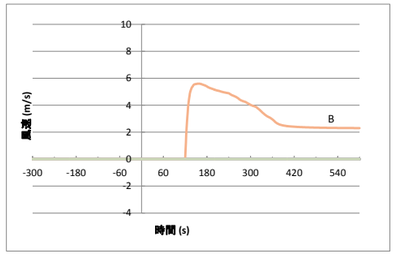
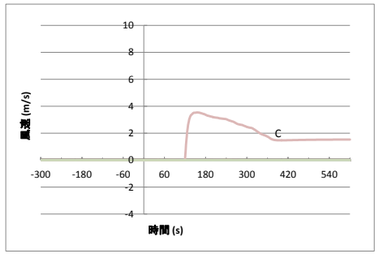
	連絡坑３ヵ所開放（A、B、C）	連絡坑１ヵ所手前開放（B）	連絡坑１ヵ所奥開放（C）
概要			
火点風速			
避難通路風速			
避難連絡坑風速			
備考	交通量：2000 台/h　排煙用ジェットファン：7 台　大型車混入率：20%　自然風抵抗：2.5m/s 分　走行速度：80 km/h		

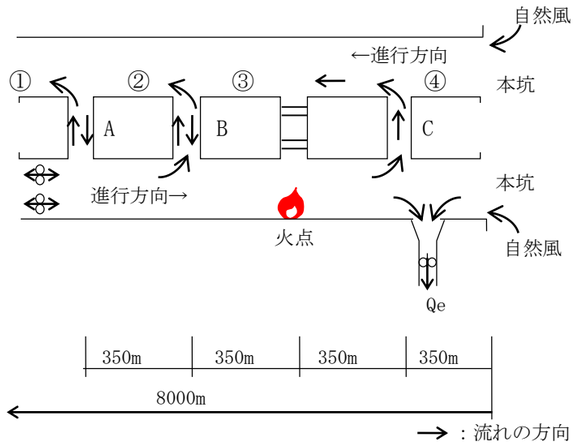
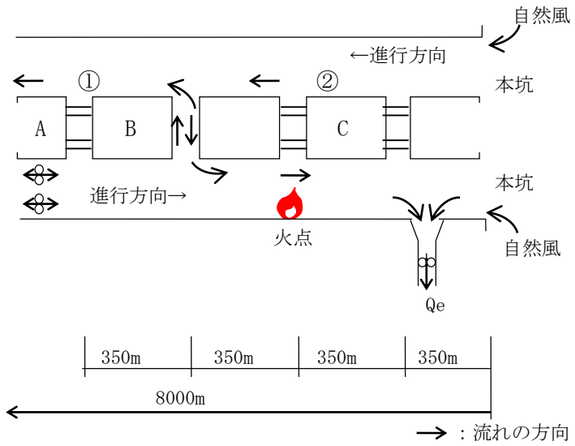
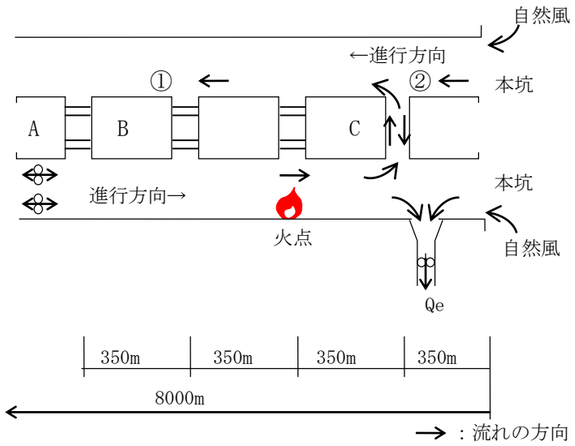
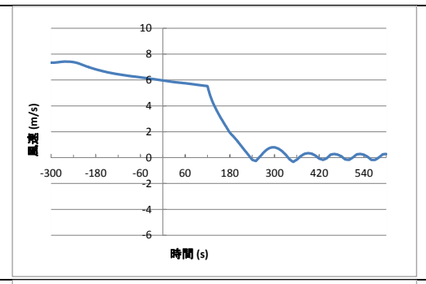
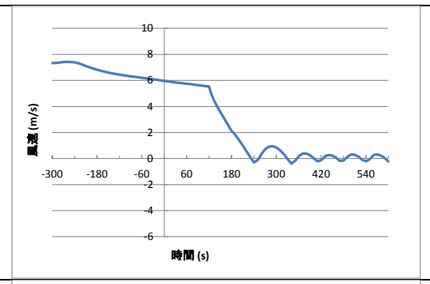
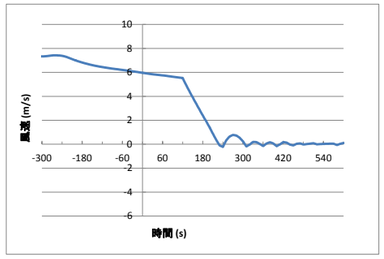
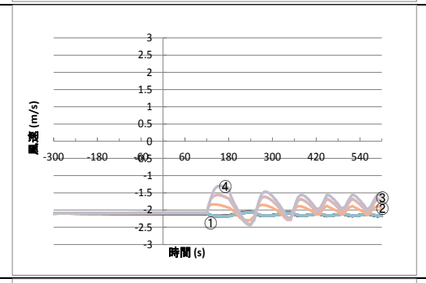
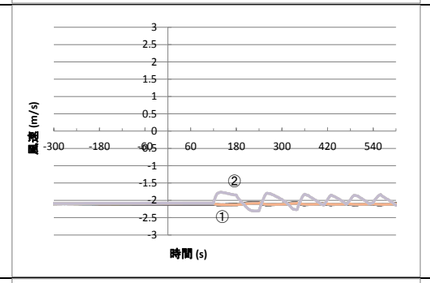
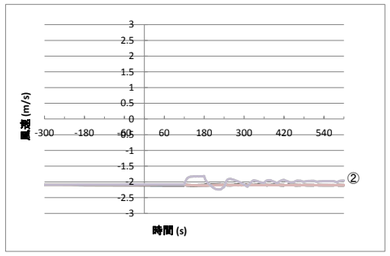
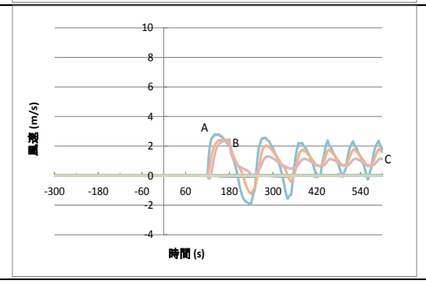
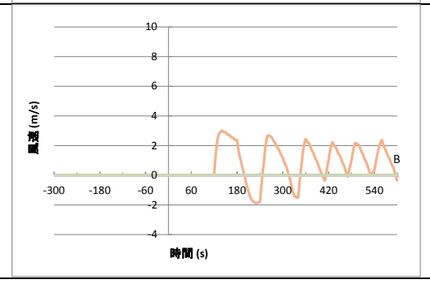
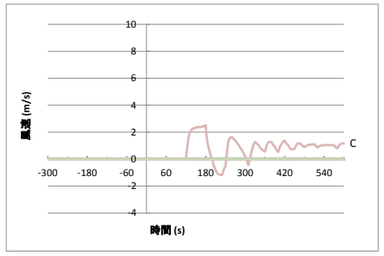
表 ５３　扉開放時の流れ（反対車線（本坑）の場合）

	連絡坑３ヵ所開放（A、B、C）	連絡坑１ヵ所手前開放（B）	連絡坑１ヵ所奥開放（C）
概要			
火点風速			
避難通路風速			
避難連絡坑風速			
備考	交通量：2000 台/h　排煙用ジェットファン：7 台　大型車混入率：20%　自然風抵抗：2.5m/s 分　走行速度：80 km/h		

３）都市内高速道路トンネル

都市内高速道路トンネルの避難通路形式は、種々ある。ここでは、反対車線への例をもとに流速及び流量について算シミュレーションした。都市内高速道路トンネルの特徴は、風速零化制御を行うことにある。零化制御は、車道内の流速や流れの方向によりジェットファンの可逆運転が行われる。その結果、車道内の圧力に正負の状況が出現し、連絡坑内の流れも反転し、呼吸することになる。火災地点付近では、都市間高速道路トンネルより影響が少ないことが明らかである。

表 ５４　扉開放時の流れ（反対車線の場合）

	連絡坑３ヵ所開放（A、B、C）	連絡坑１ヵ所手前開放（B）	連絡坑１ヵ所奥開放（C）
概要			
火点風速			
避難通路風速			
避難連絡坑風速			
備考	交通量：2920 台/h　排煙用ジェットファン：38 台　大型車混入率：25%　自然風抵抗：-2.5m/s 分　走行速度：43 km/h　排気量（Qe）：480m^3/s		

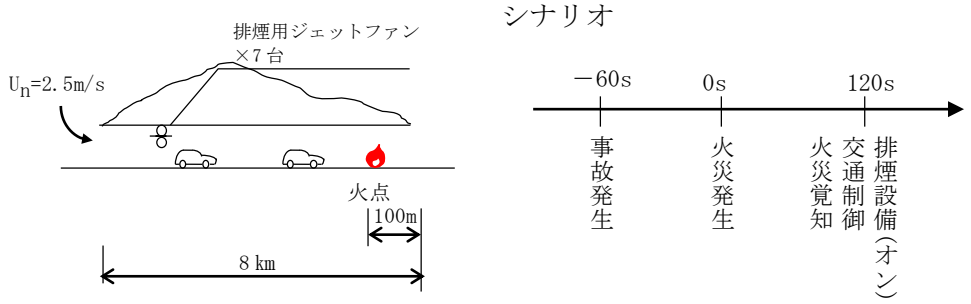
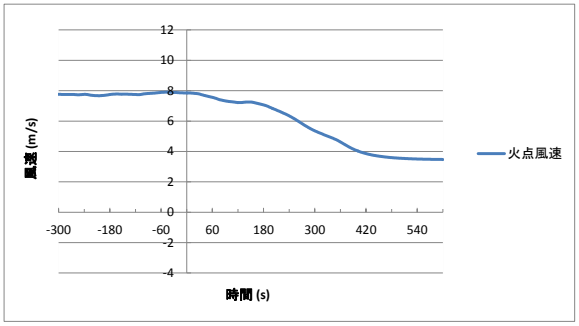
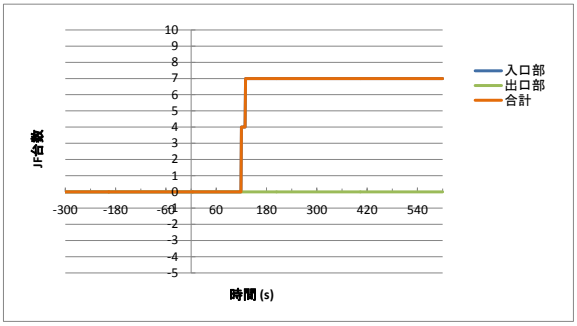
（３）　火災時の排煙制御方法

都市間高速道路トンネルの排煙設備は、トンネル内の停止車両を考慮し、自然風 2.5m/s に相当する抵抗分を見込み規模を決めている。トンネル延長 8 km、大型車混入率 25%、交通量 2000 台/h、走行速度 80 km/h の場合の排煙設備規模は、表 41 に示すとおり口径 1250 のジェットファン７台である。

１）ジェットファンの運転と車道内風速

排煙用ジェットファン(排煙設備)は、火災覚知と同時にオンされる。この場合、自然風が追風 2.5m/s あると表 52 に示すように 4m/s に近い車道内風速が生ずることになる。

表　５５　排煙時の車道内風速（追風の場合）

<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2">シナリオ
 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">火災風速</td><td>ジェットファン運転状況</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

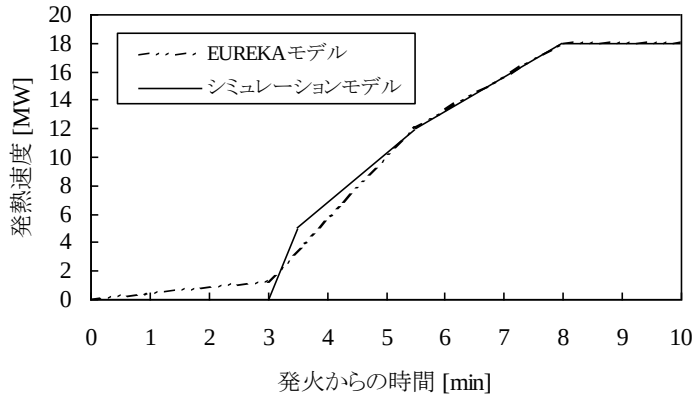
２）火災時の煙の状況

一方通行トンネルにおける火災時の排煙風速は、煙の遡上を防止、火源の抑制及び下流側の避難環境を考慮しつつ、縦断勾配 3%以下のトンネルは 2m/s 程度以上を目標としている。しかし、前記したように実際の火災時には、換気機のオンかオフの制御しか行っていないので、自然風の状況によっては 4m/s 程度の縦流風が流れることもある。縦流風 2m/s、4m/s の状況での火災地点下流側の煙の状況を把握するために、著者の一人が開発した三次元火災シミュレーション（Firless）を用いて検討を行った。

(a) シミュレーション条件

シミュレーション条件は、表 56 に示すとおりとした。

表 ５６　火災シミュレーション条件

トンネル形状	馬蹄形	長さ	800m&1000m（dx=0.5m）
		高さ	7.219m（dy=0.344m）
		幅	11.3m(dz=0.419m)
解法 (移流項スキーム)	速度場	4 次精度中心差分	
	温度場	3 次精度風上差分	
	濃度場	1 次精度風上差分	
境界条件	内壁表面熱伝達係数 [W/m^2・K]	5.8+4.0uc　，　uc=(293/T_∞)・u_∞ T_∞:壁に接するセル中心温度 u_∞:壁に接するセル中心速度	
	外壁表面熱伝達係数 [W/m^2・K]	20 W/m^{2}K	
	熱物性値	壁材質	コンクリート
		比熱	1200J/kg･K
		密度	2340kg/m^3
		熱伝導率	2.08W/m･K
乱流プラントル数 乱流シュミット数	0.7 0.7		
乱流モデル	LES モデル　（スマゴリンスキー定数=0.15～0.2）		
発熱速度	最大発熱速度=18MW（対流成分） 		

２）停止車両の配置

停車車両は大型車混入率を 25%として、以下の図 38 に示すように大型車および小型車を配置した。各車両のサイズは一般的なものとし、車頭間隔は小型車 6m、大型車 12m とした（道路トンネル技術基準）[2]。

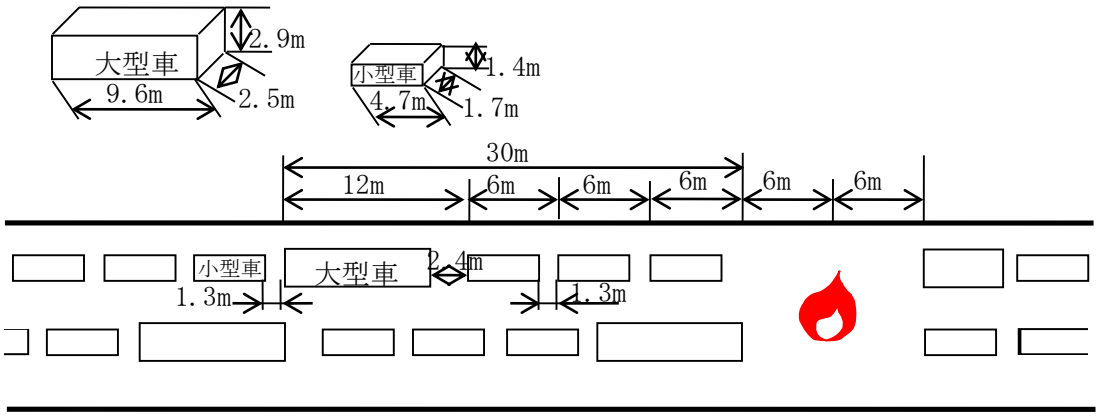


図 ３８　停止車両の配置

（ｃ）シミュレーション結果

表 ５７　縦流風の違いによる車道内煙濃度

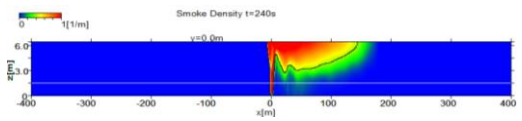
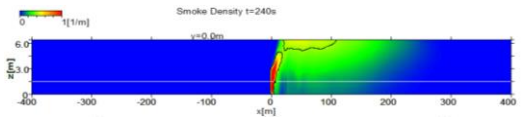
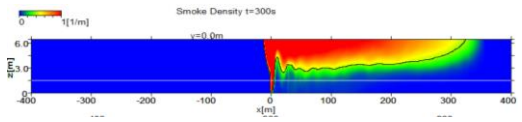
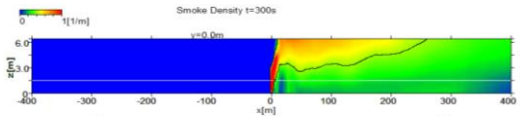
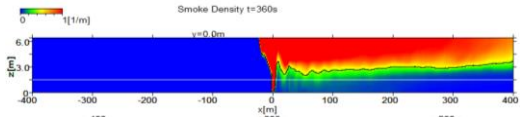
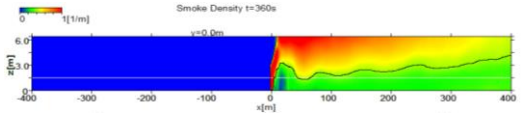
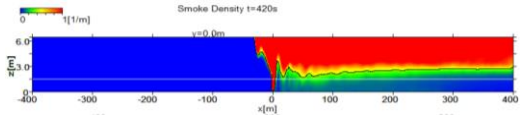
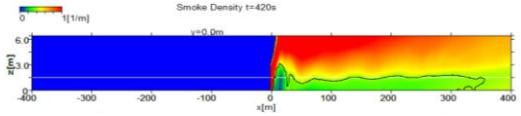
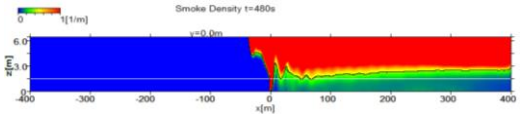
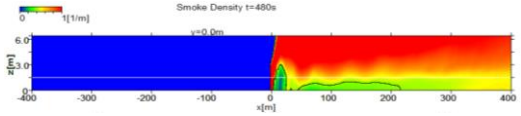
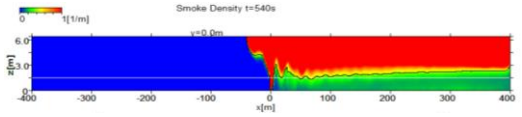
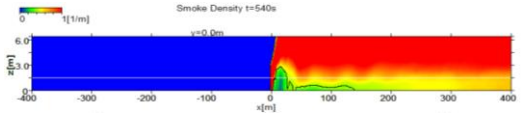
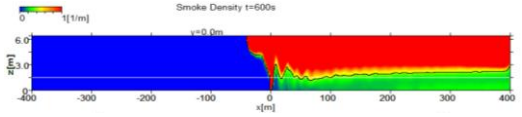
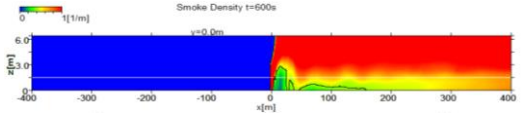
Cs 濃度分布図		
Time	縦流風 2m/s	縦流風 4m/s
t＝240s		
t＝300s		
t＝360s		
t＝420s		
t＝480s		
t＝540s		
t＝600s		

表 57 は、縦断勾配 0%の結果であるが、縦流風速 2m/s では下流側で人の目の高さの代表値である 1.5m の高さに濃度の高い煙は無く避難環境を守れるものの 4m/s の場合時間と共に煙が拡散し状況が悪化している事が認められる。

６－３　対応方法と試算

これまでに縦流換気方式について換気と避難施設の関係についての課題の抽出を行ってきた。トンネル火災時の際に延長や火災地点によっては、発災トンネル内の車道内圧力が高いこと、避難扉が解放された場合、かなりの流速で非発災側への流れの生ずること、都市間高速道路トンネルの火災時の排煙設備の運用法では火点下流側に停止車両のある場合その避難環境が望ましいものでないこと等の課題が抽出された。ここでは、これらの課題に対する対応方法についての立案及び試算を行いその改善の状況を示す。

６－３－１　対象延長

都市間高速道路トンネルの避難口扉の圧力に対する標準仕様は、290Pa である。従って、表 46 の結果をもとにトンネル延長 6 km以上を対象とする。一方、都市内高速道路トンネルは、表 49 の結果から零化の影響があり、負圧が大きいことから 4 km以上を対象とする。

都市間高速道路トンネルと都市内高速道路トンネルでは、交通条件、換気方式及び火災時の風速コントロール方法が異なる。従って、対応方法も異なってくる。

表　５８　対応方法の検討

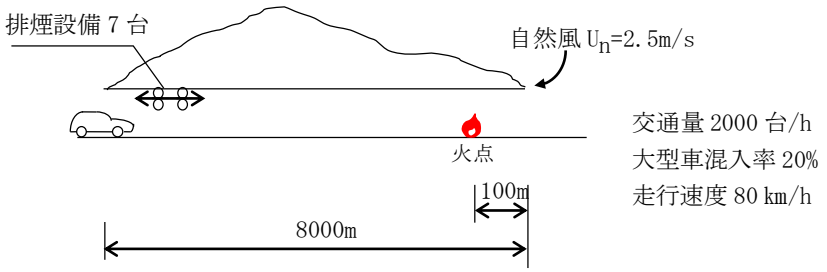
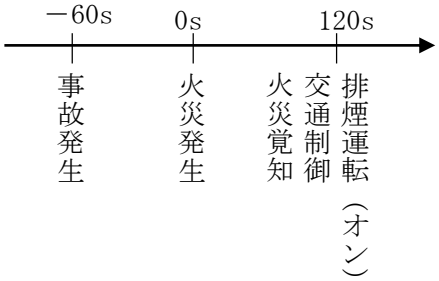
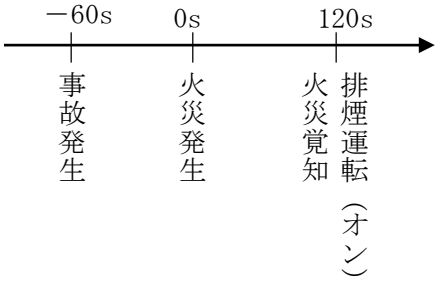
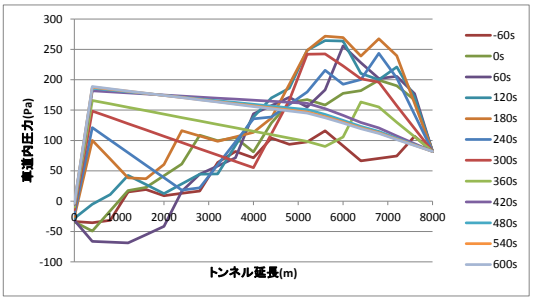
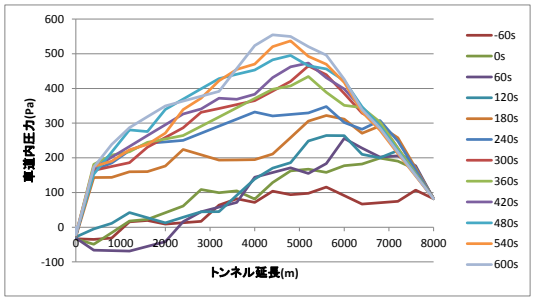
	都市間高速道路トンネル	都市内高速道路トンネル
交通関連	坑口の交通制御の影響及びトンネル内の交通制御の影響を検討する	
換気制御関連	オン、オフ制御が行われているので、定風速化制御の影響を検討する	（零化制御が行われている。）
避難口扉関連	避難口扉は、開口部の構造から 1 枚又は、2 枚構造となっているが許容圧力に制限があるので工夫が必要となる。	
その他	圧力上昇に伴う安全空間への影響を検討する。	

６－３－２　交通制御との関連

（１）坑口での交通制御と車道内圧力

車道内圧力の変化は、交通換気力で生じた流れを、車両が停止することで抵抗となることや排煙設備の運転に伴うジェットファンの昇圧力、特に零化を行うことにより躊躇となる。零化の運転は、車道の流速を対象に行われるので、一番影響を与えるのは交通条件となる。シナリオでは、発災から 120 秒後に坑口で交通制御を行うことにしている。これは、発災した閉鎖空間に入る危険性を避けるために行うものであり車道内圧力の面から見ても必要なことである。車道内圧力は、トンネル延長が長いほど影響がある。トンネル延長 8 kmで坑口の交通制御が行われなかった場合と行なった場合の相違を表 59、60 に示す。

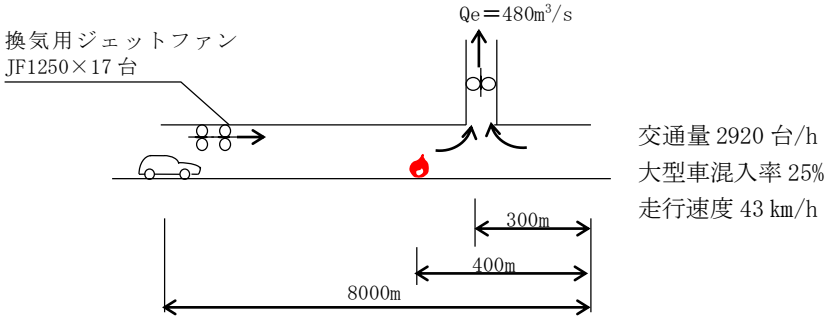
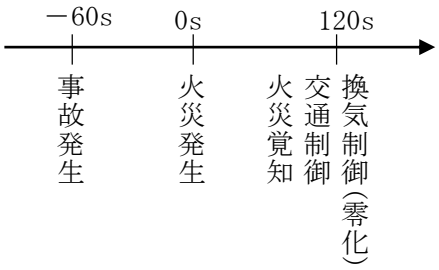
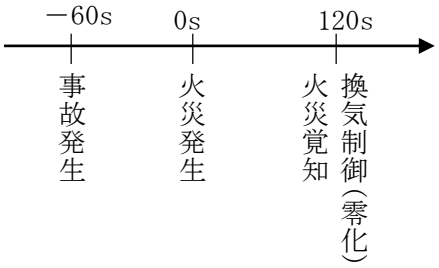
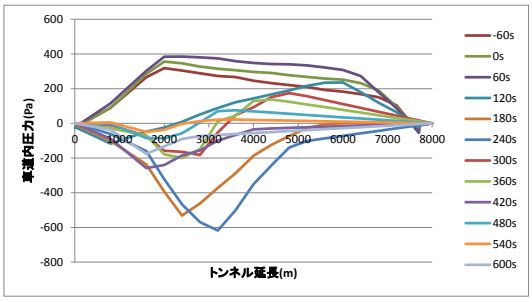
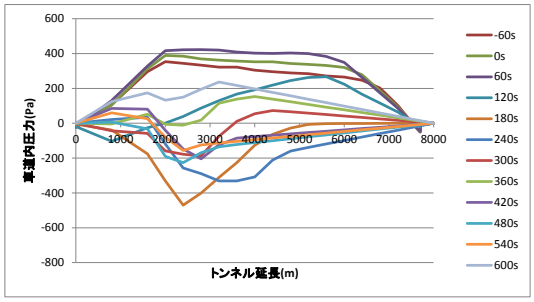
表 ５９　都市間高速道路トンネルの坑口流入車両の影響

<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td></td><td>坑口停止</td><td>坑口停止なし</td></tr>
<tr><td>シナリオ</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>シミュレーション結果</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

都市間高速道トンネルの結果は、表 59 の通りであり坑口で交通制御する場合、事故の発生する-60 秒から事故地点の圧力が徐々に上昇し火災発生から 120 秒乃至 180 秒後で圧力がピークとなる。その値は 270(Pa) 程度である。その後坑口部のジェットファンが運転されることにより入り口側の圧力が高くなる。

一方、坑口の交通制限をしないと圧力のピークは、経過時間とともに上昇し避難対象時間の 600 秒で最大となり 550(Pa)を超える。また、圧力の高くなる範囲も坑口で車両を停止した場合よりも広がることが認められる。

表 ６０　都市内高速道路トンネルの坑口流入車両の影響

<table>
<tr><td>概要</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td></td><td>坑口停止</td><td>坑口停止なし</td></tr>
<tr><td>シナリオ</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>シミュレーション結果</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>排煙設備</td><td>零化用排煙設備
JF1250×42 台</td><td>零化用排煙設備
JF1250×48 台</td></tr>
</table>

都市内高速道路トンネルの場合、風速零化制御を行なうのでジェットファンの逆転とともに車道内圧が負圧となる範囲が生じてその値が大きい。また、当初は換気用として正転運転をするため出口側で停止する車両による圧力上昇と同程度の圧力となり広範囲で圧力が上昇する。その後は、零化に伴う逆転運転による負圧が生ずる。坑口停止の有無による圧力の高さに大きな差はないが必要となる排煙設備規模に差が出る。

（２）トンネル内での車両の制御

坑口から車両の流入を停止することにより車道内圧の影響は、大きく変わることが分かった。そこで車道内圧を抑えるためにトンネル内の交通を停止させる場合の影響について検討を行う。トンネル内 1 kmごとに情報板又は信号等で交通を分断停止できる場合の検討を行った。その結果を表 61 に示す。

表 ６１　都市間高速道路の交通制御及び風速制御と車道内圧

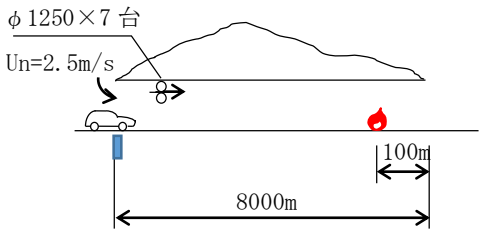
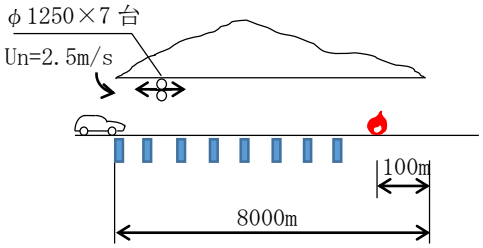
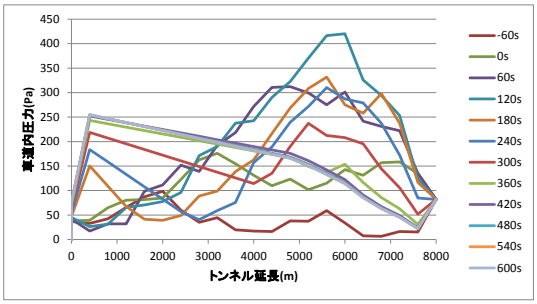
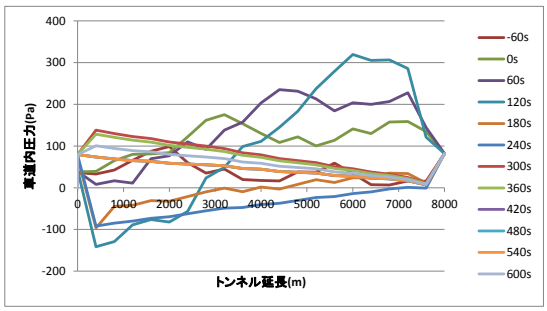
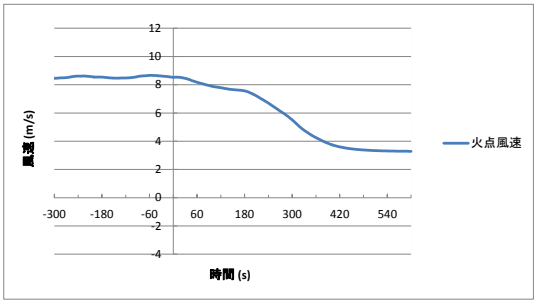
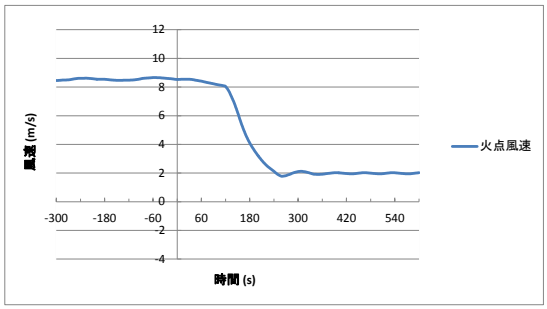
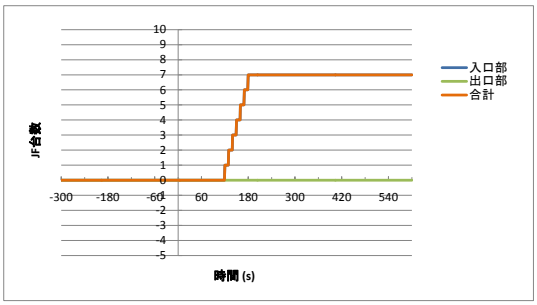
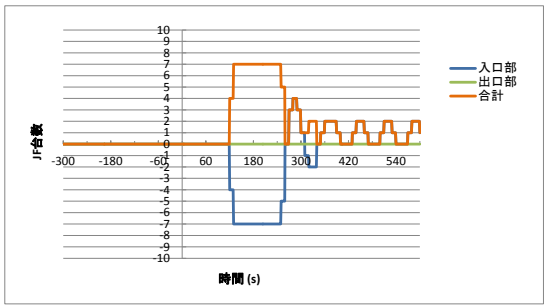
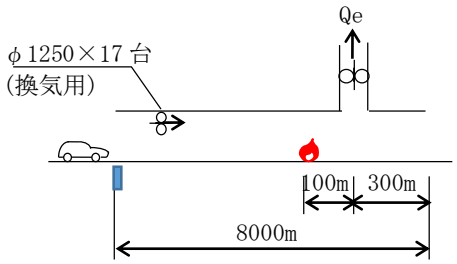
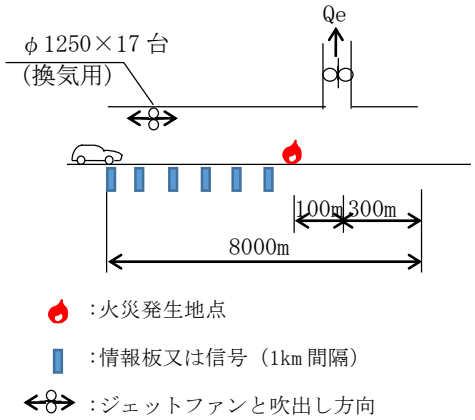
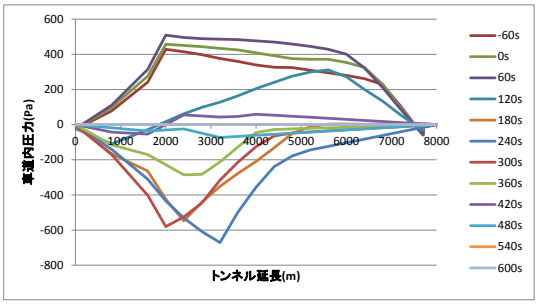
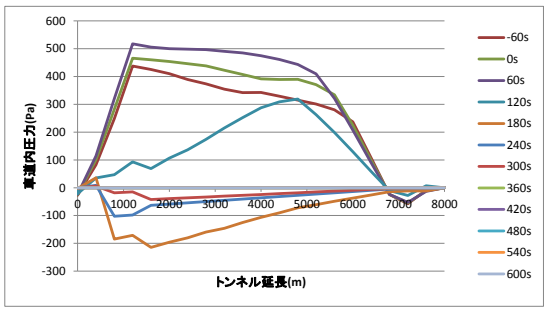
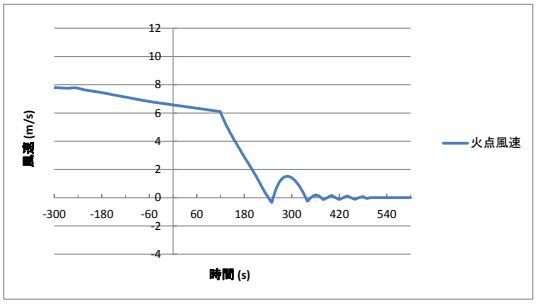
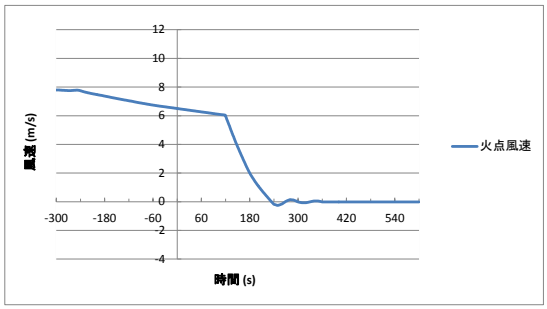
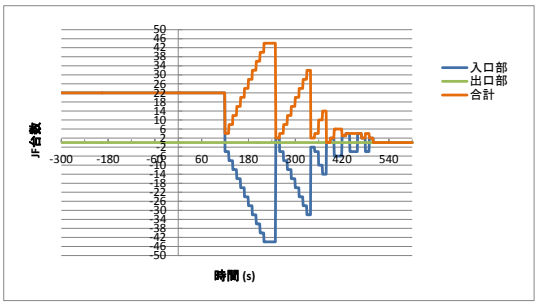
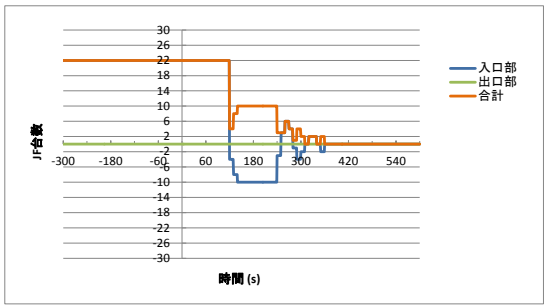
	入口停止、排煙設備オン	入口及びトンネル内停止、定風速制御
概要		 ：火災発生地点 ：情報板又は信号（1km 間隔） ：ジェットファンと吹出し方向
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2500 台/h　大型車混入率 20%　走行速度 80 km/h　自然風 Un＝＋2.5m/s	

表 61 は、都市間高速道路トンネルの例である。一般的に行われている火災時のシナリオ（坑口車両停止、排煙用ジェットファンオン）の場合とトンネル内で 1000m 程度の間隔で車両を停止するとともに縦流風 2m/s になるように風速制御を行ったケースの二つを比べたものである。トンネル内で交通制御と一定風速制御を行うことで表 46 に示す最大圧力が生ずる条件（2500/h,20%）において車道内圧力が 120Pa 程度減少しほぼ 300(Pa)に近い値で収まる。また、120 秒でジェットファンによる負圧が生ずるが大きな値とはならない。

一方、表 62 は、都市内高速道路トンネルの例である。8000m のトンネルの場合、換気用として 17 台のジェットファンが入り口側に設置され､そのジェットファンの運転により最大値が決まる。交通制御を行う事に対する最大値への影響は大きくないが負圧に対しては大幅に減少することを示している。これは、交通制御による風速零化用のジェットファンの設備規模の違いから来ている。(坑口制御のみのジェットファン必要台数：42 台、トンネル内交通制御を行う場合のジェットファン必要台数：７台；いずれも出口火災に対する規模)

以上のようにトンネル内を含めた交通制御の効果は大きい事が認められた。

表 ６２　都市内高速道路トンネルの交通制御及び風速制御と車道内圧

	入口停止、零化制御	入口及びトンネル内停止、零化制御
概要		
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2790 台/h　大型車混入率 30%　走行速度 43 km/h	

６－３－３　反対車線の換気機の運用

（１）都市間高速道路トンネル

１）反対車線の排煙設備の運用

避難通路として反対車線を利用する場合、扉の開放に伴う空気の流れや煙の流入を防ぐ方法を考慮する必要がある。

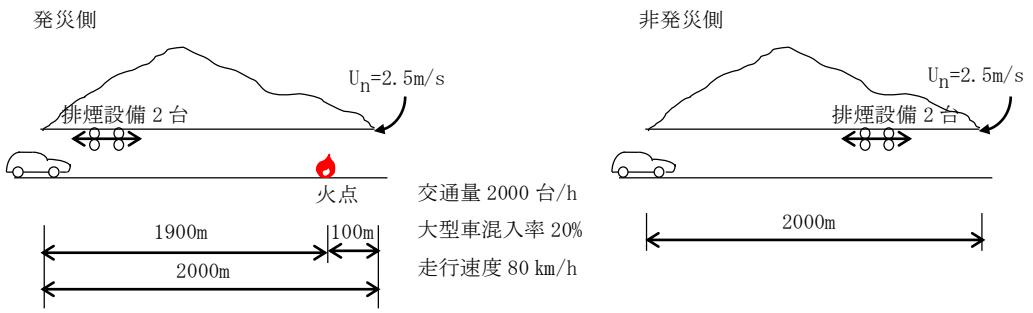
都市間高速道路トンネルの場合、排煙設備は入口側坑口に設置される。そこで反対車線の換気機を利用する方法である。これには二つの方法が考えられ、一つはそのままの設備を利用する方法であり、二つ目は設備を増加する方法である。トンネル延長ごとの排煙設備は、表 41 に示した通りである。反対車線は、避難通路として利用する場合極力早く閉鎖する必要ある。そこで閉鎖時間と車道内圧の関係を求めてみる。

表 63、64 は、延長 2000m 及び 8000m の発災側と反対車線側の車道内圧力を同時、60 秒、180 秒及び 300 秒後の 4 ケースについてシミュレーションを行ったものである。発災側は、圧力上昇の高い出口部火災を想定している。2000m の場合、発災側のトンネルの最大圧力は 0、60 秒後に 100（Pa）程度、火災発生 120 秒後に 140（Pa）程度となり、その後はジェットファンの昇圧力 50（Pa）程度に落ち着く。これに対し反対車線の同一設備を運転すると反対車線の圧力が高くなる時間も遅れ起動時間が遅れるとそのまま圧力上昇時間の遅れとなる。いずれにしても発災トンネルの最大値には対応できないが、反対車線の対応が早いほど発災側との圧力差は小さいことが認められる。

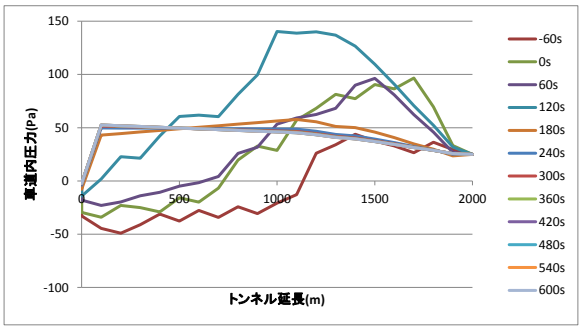
延長 8000m の場合は、トンネル内に移動する時間が長くなるので事故が発生してから 300 秒程度圧力の高くなる時間帯が発生する。表 64 から非発災側の換気機を同時に運転してもこの時間帯に対応することは難しい。

なお、定風速化制御を行うことで発災側の最大圧力は多少抑えることが可能である（表 63、64 下段右参照）

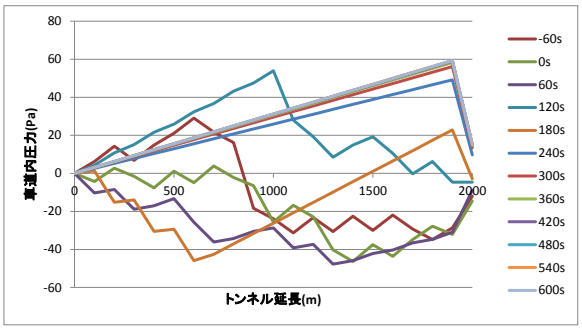
表 ６３　反対車線車両停止時期と車道内圧（トンネル延長２km：排煙設備片側）



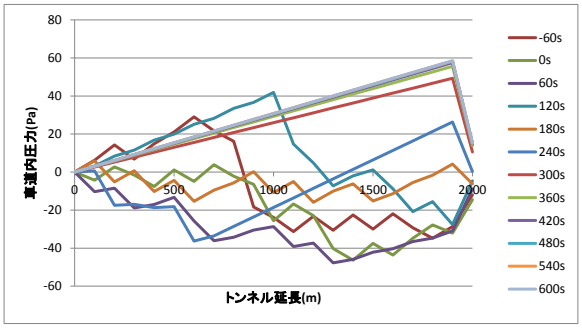
発災側トンネル



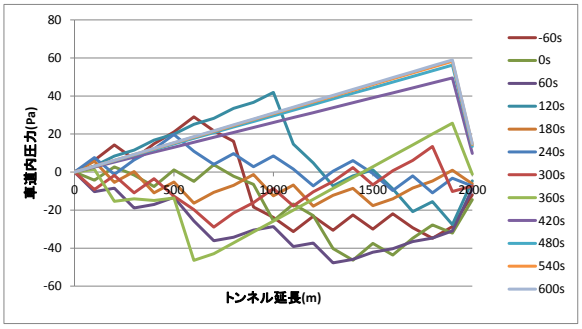
反対車線同時制御（火災発生 120 秒後制御）



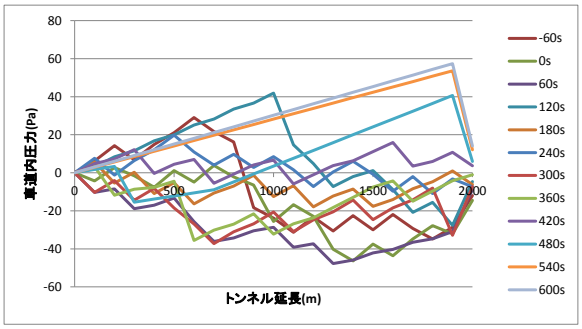
反対車線（火災発生 180 秒後制御）



反対車線（火災発生 300 秒後制御）



反対車線（火災発生 420 秒後制御）



発災側トンネル風速制御

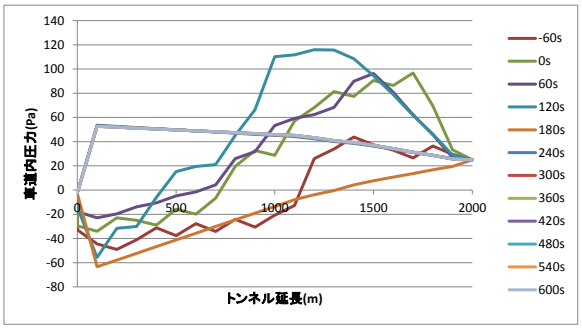
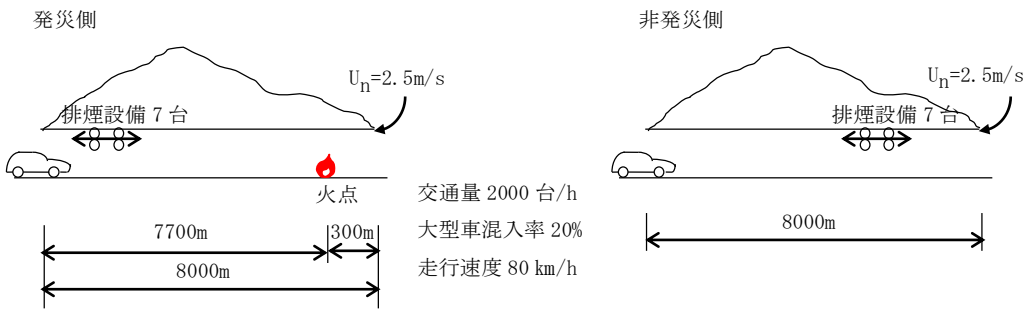
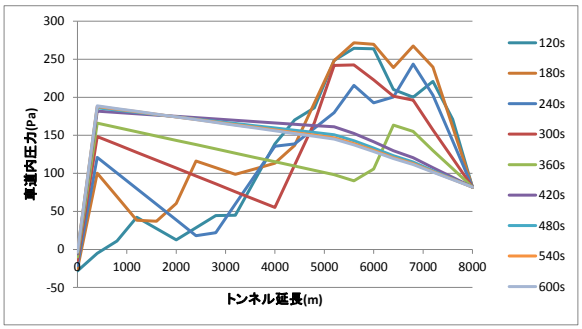


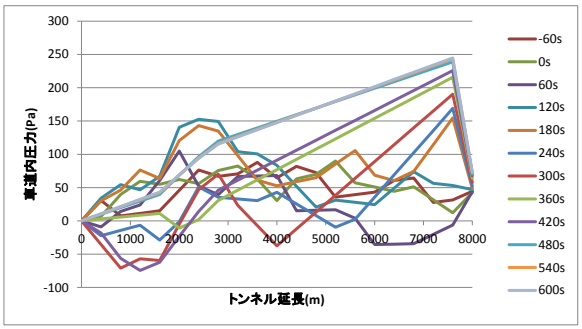
表 ６４　反対車線車両停止時期と車道内圧（トンネル延長 8 km：排煙設備片側）



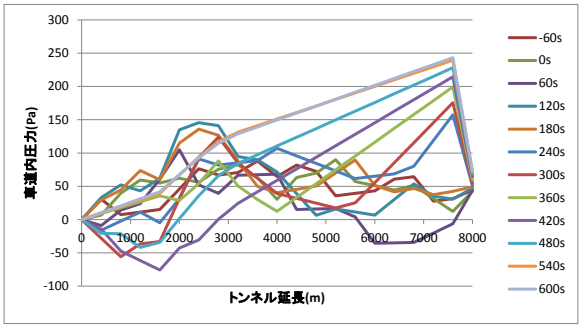
発災側トンネル



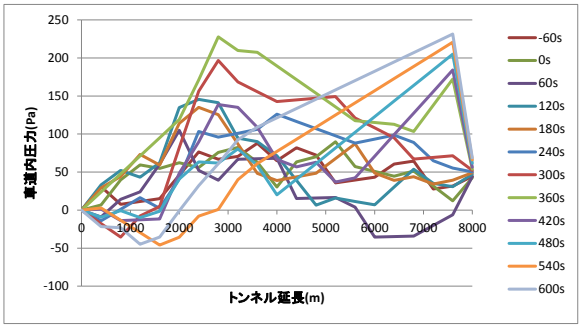
反対車線同時制御（火災発生 120 秒後制御）



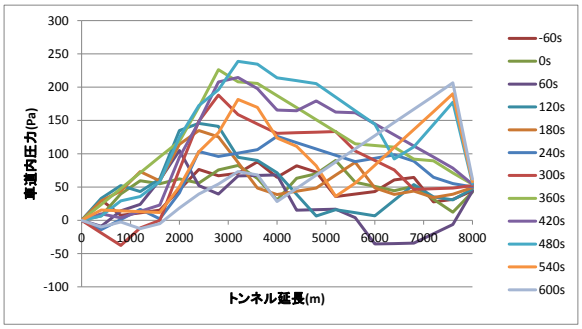
反対車線（火災発生 180 秒後制御）



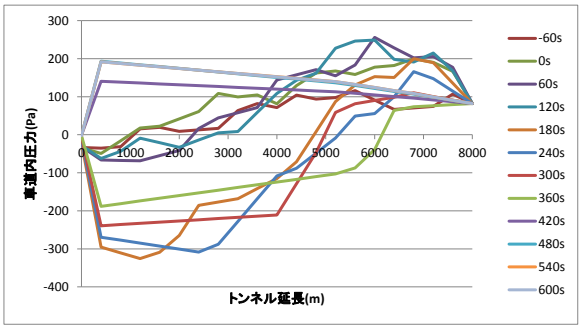
反対車線（火災発生 300 秒後制御）



反対車線（火災発生 420 秒後制御）



発災側トンネル風速制御



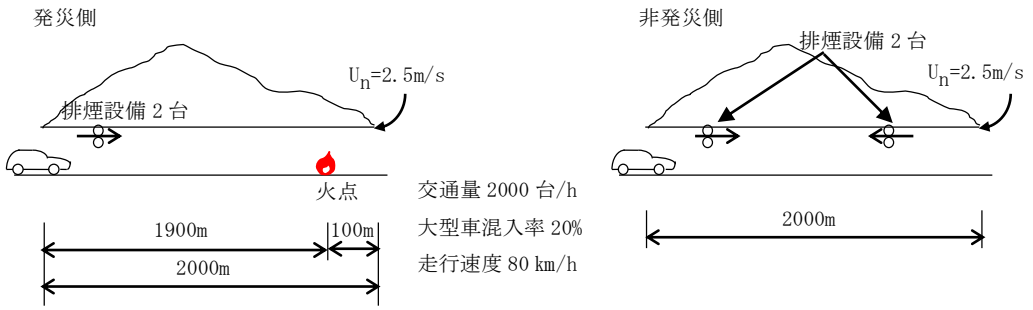
２）排煙設備の追加

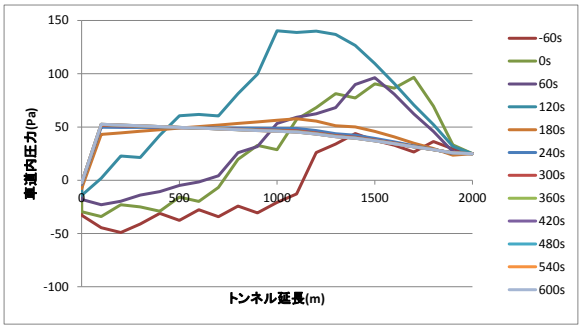
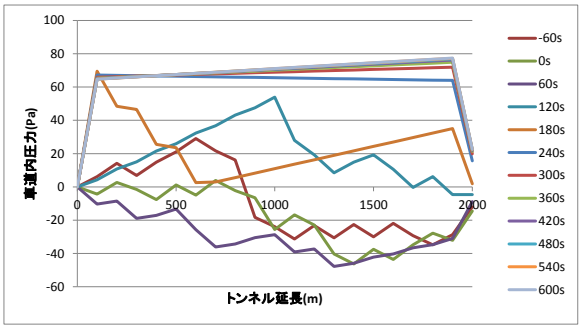
表 65 は､延長 2km 及び 8 kmトンネルの両坑口に排煙設備を設置した場合を示したものである。8km のトンネルで圧力が高くなるのは、トンネル内に車両が走行する時間が長くなるので 120 秒～300 秒の間でありその値も 250（Pa）を超える。反対車線の換気機を運転すると排煙用設備も多いので坑口部の圧力上昇も大きくなるが、発災側と同時運転しても時間的対応は困難である。ただできるだけ対応する為には、反対車線も早期の対応が望ましい。

現状では、排煙設備はトンネル入口側坑口に設置される。これを発災車線側の予備（排煙機直下の火災）と反対車線の対応のために入口側と出口側に排煙設備を設置する方法である。反対車線の排煙設備を内側に向けて運用することにより車道内圧力は、火災初期の時間帯を除けば常に圧力を高く保つことが可能である。発災側と同時に換気機を運用した場合、トンネル延長 2 kmの場合は 240 秒後、トンネル延長 8 kmの場合は 360 秒以後全線で発災区間より高く保つことができるのでそれ以降は避難通路となる反対車線へ空気（煙）が流入することはない。

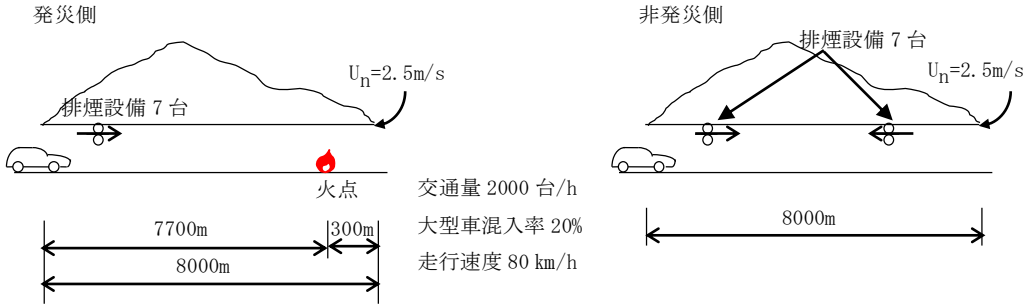
表 ６５　反対車線車両停止時期と車道内圧（排煙設備両側設置）

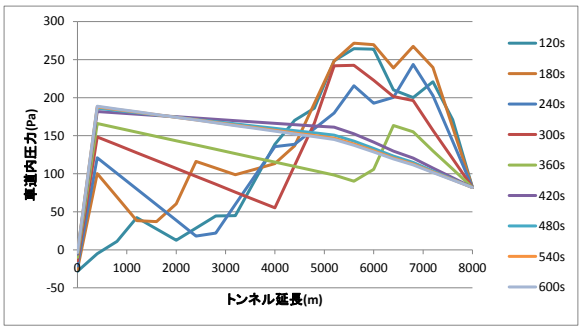
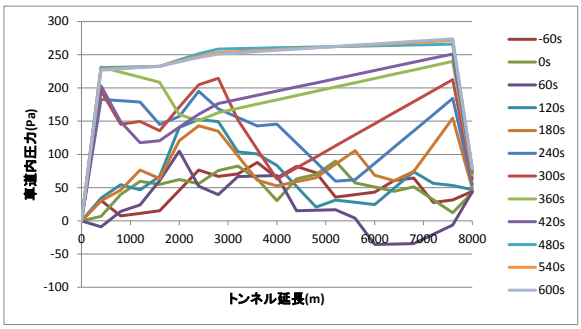
延長 2 km



発災側トンネル	反対車線同時制御（火災発生 120 秒後制御）
	

延長 8 km



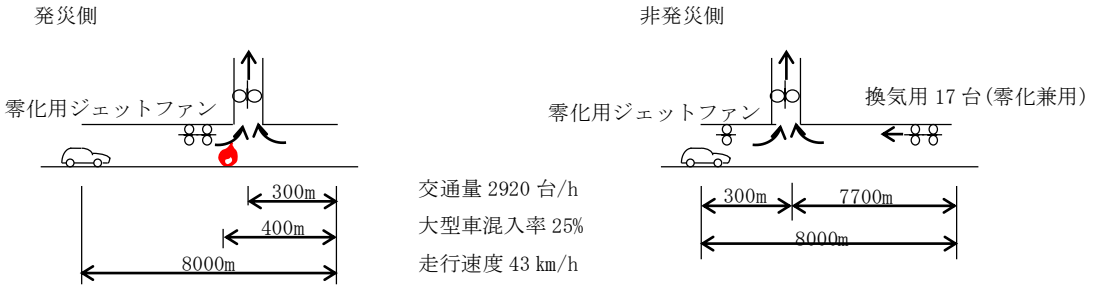
発災側トンネル	反対車線同時制御（火災発生 120 秒後制御）
	

（２）都市内高速道路トンネル

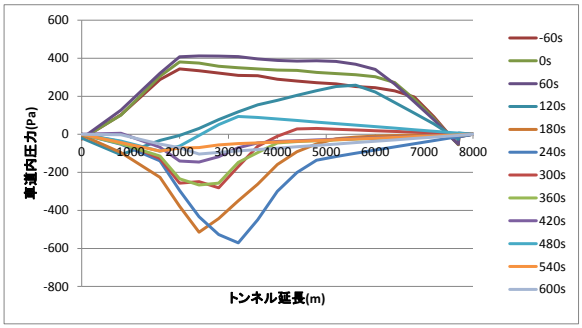
都市内高速道路トンネルは、風速零化が行なわれるので車道内の圧力分布は、都内内高速道路トンネルと異なる。表 66 は、トンネル延長 8 ㎞の例であるが、換気用として 17 台のジェットファンが運転されるので火災が生じ車両が停止し始めるとトンネル全体の圧力が高くなり零化が始まると負圧が生ずる。反対車線は、換気用として運転されているので当初より圧力が高くなっているが発災トンネルより低い値である。発災側と比較すると 240 秒後なら対応可能である。また、都市内の場合零化が行われることにより本ケースでは、時間経過とともに負圧となるので反対車線の運転があまり関係なくなる。

ただし、零化を行うために数多くのジェットファンが設置されているのでこのファンを利用することによりトンネル全体がカバーできる。発災トンネルと同時に零化用の出口側に設置したジェットファンを逆転運転すると 240 秒後には、トンネル全体に圧力が上昇しほとんど圧力差のない状況を確保できる（表 66 下段右参照）

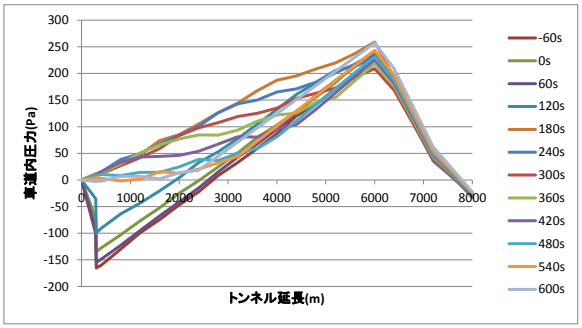
表 ６６　都市内高速道路トンネルの反対車線対応（トンネル延長 8 km）



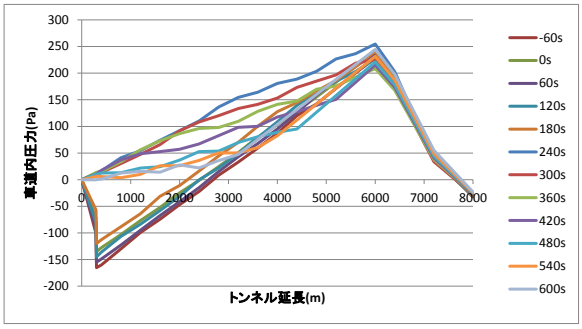
発災側トンネル



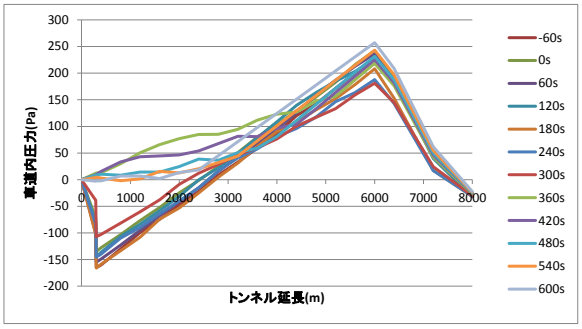
反対車線同時制御（火災発生 120 秒後制御）



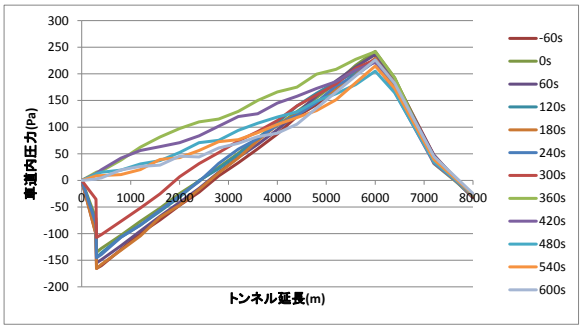
反対車線（火災発生 180 秒後制御）



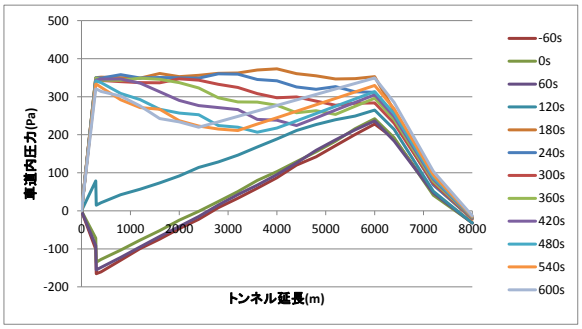
反対車線（火災発生 300 秒後制御）



反対車線（火災発生 420 秒後制御）



反対車線トンネル出口側逆転運転



６－３－４　換気制御との関連

都市間高速道路トンネルの場合、火災時は火災覚知と同時に排煙設備はオンとなり、特に細かな制御は行われていない。この排煙設備の規模は、自然風の 2.5m/s に相当する圧力を抵抗としていて見込んでいる。この自然風が順風の場合、車道内風速は 4m/s 近くなる。この風速を 2m/s までに制御すると 2m/s になる時間と圧力の値は、延長によってまちまちであるが車道内圧は低下する。

表　６７　都市間高速道路トンネル火災時定風速化制御（8 km）

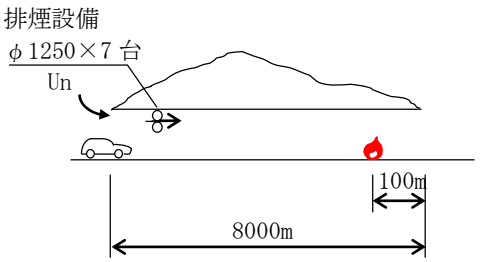
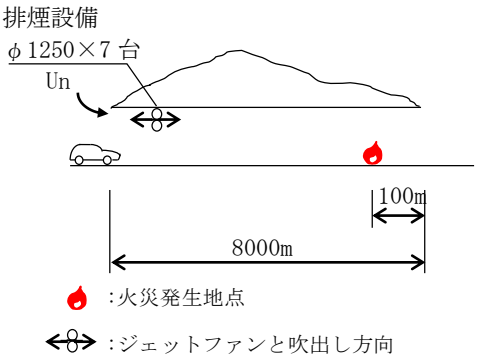
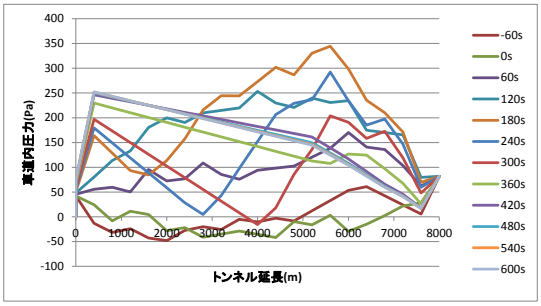
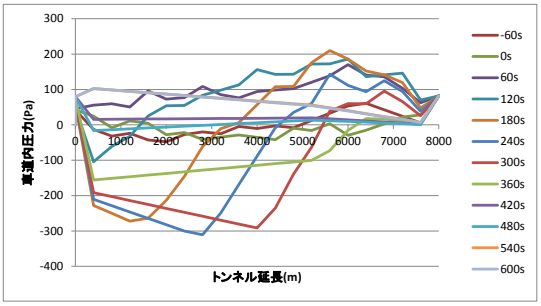
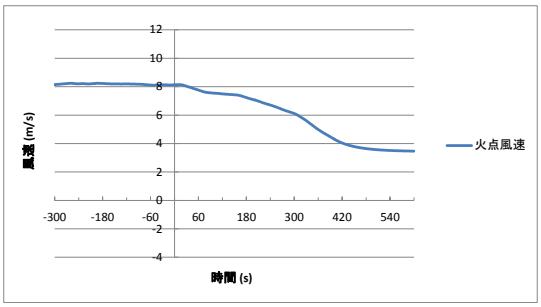
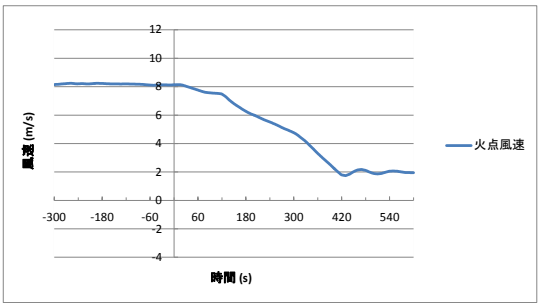
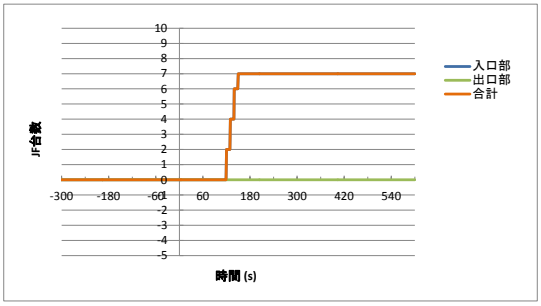
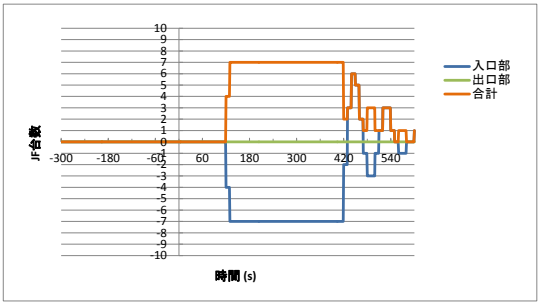
	排煙設備オン	排煙設備制御
概要		
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2000 台/h　大型車混入率 30%　走行速度 80 km/h	

表 ６８　都市間高速道路トンネル火災時定風速化制御（6 km）

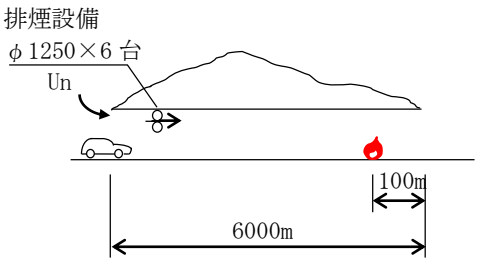
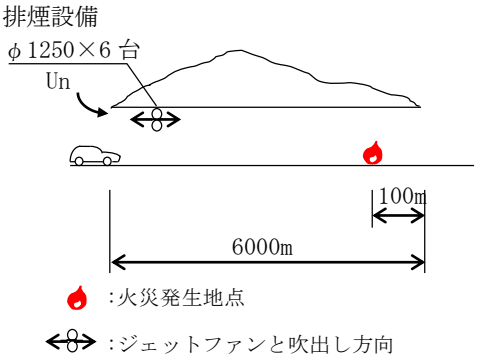
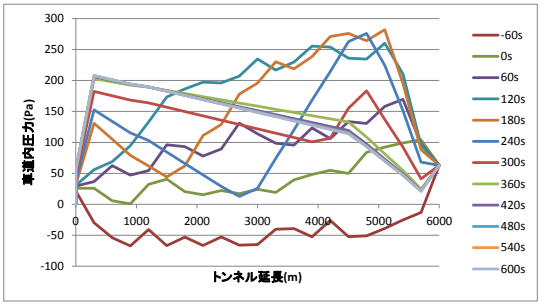
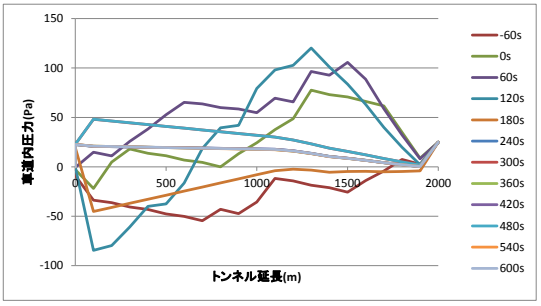
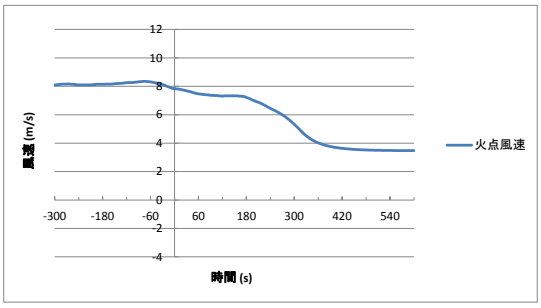
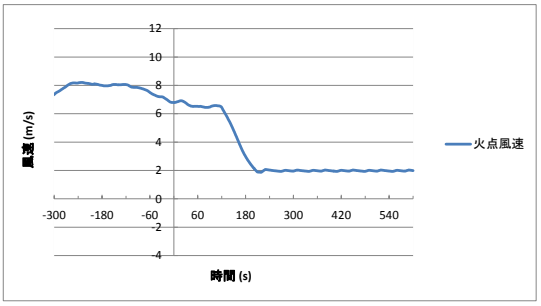
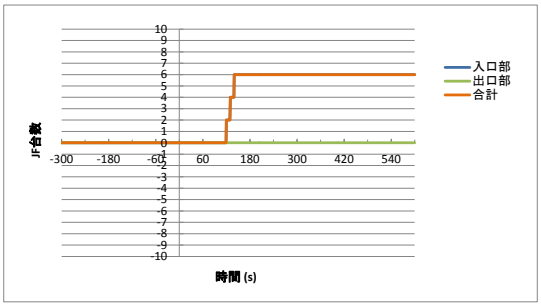
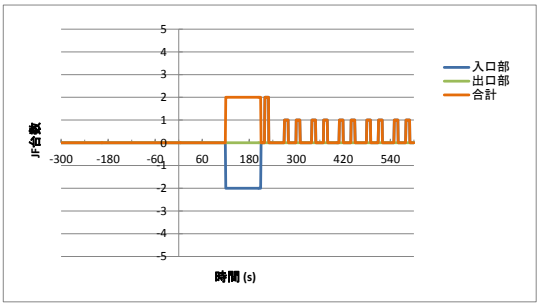
	排煙設備オン	排煙設備制御
概要		
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2000 台/h　大型車混入率 30%　走行速度 80 km/h	

表 ６９　都市間高速道路トンネル火災時定風速化制御（4 km）

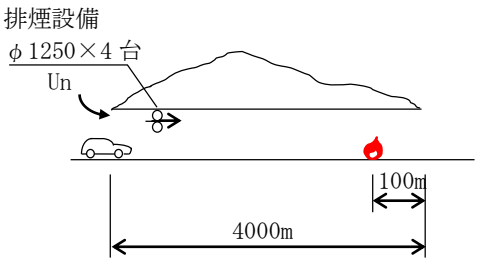
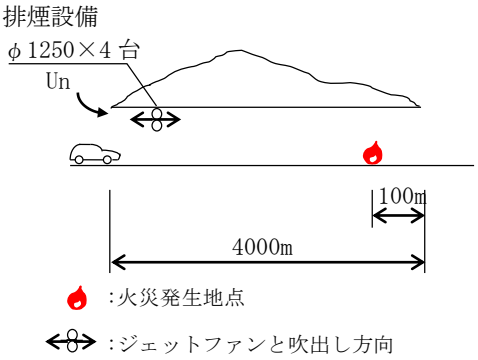
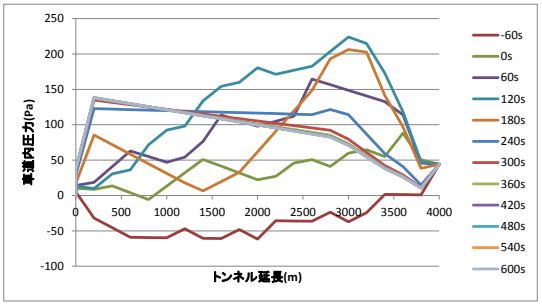
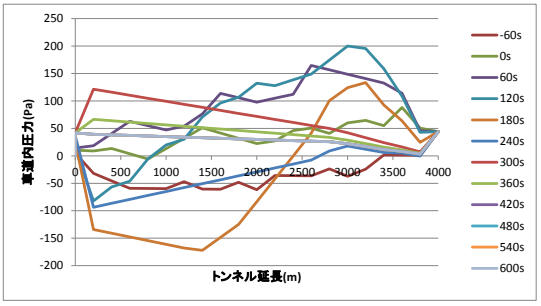
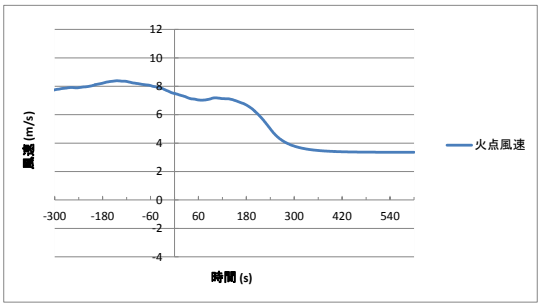
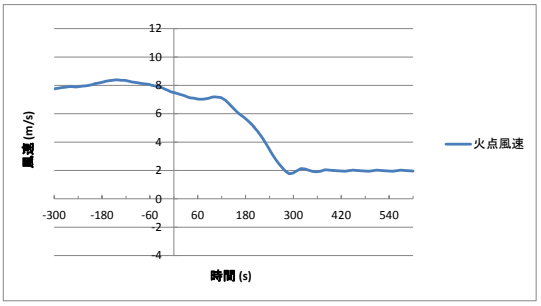
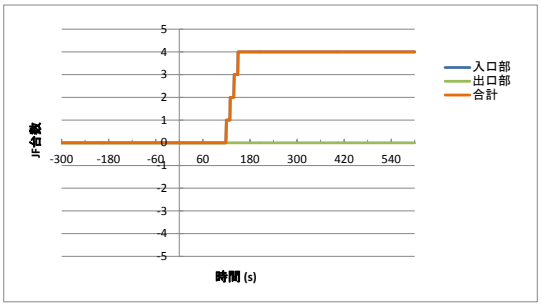
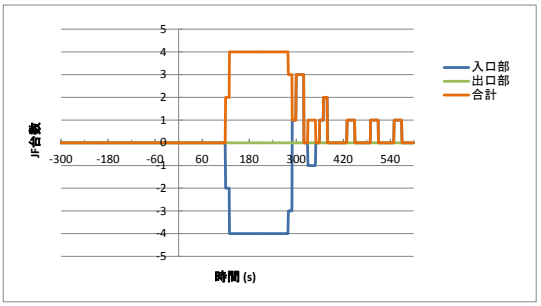
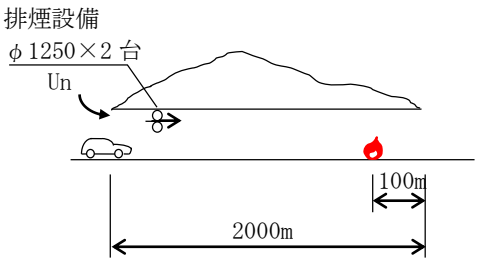
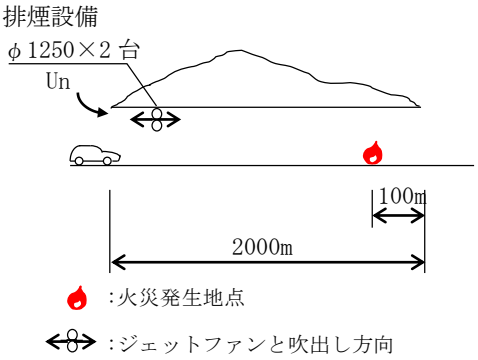
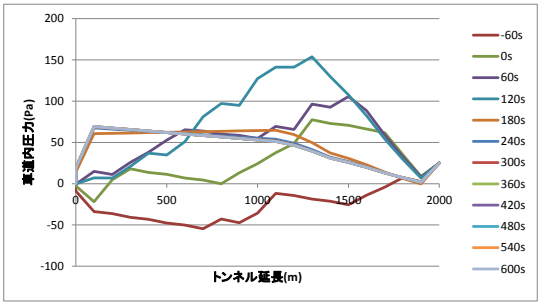
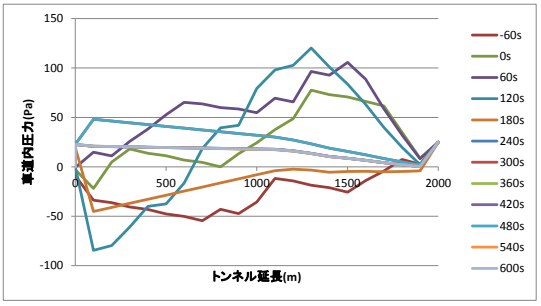
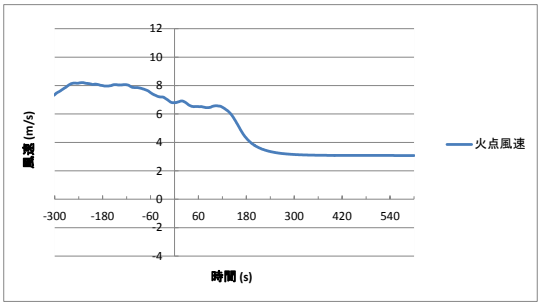
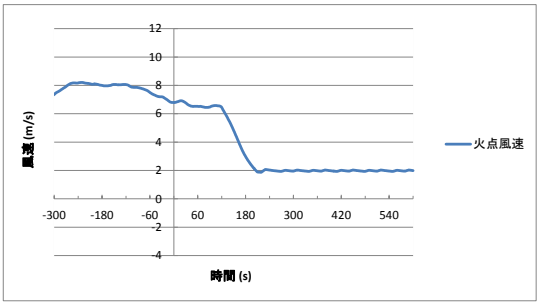
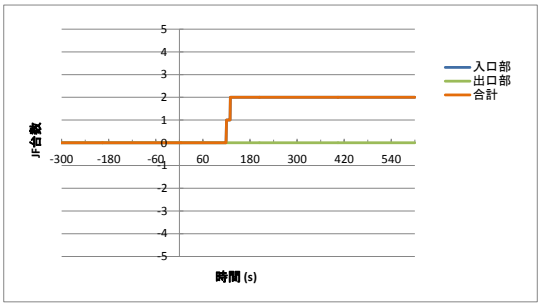
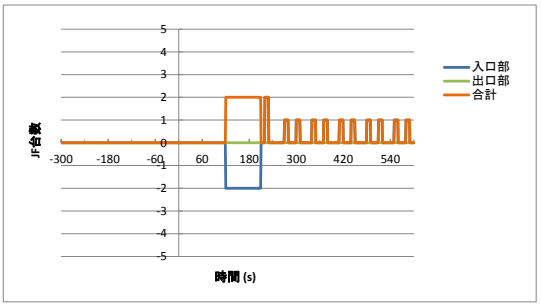
	排煙設備オン	排煙設備制御
概要		
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2000 台/h　大型車混入率 30%　走行速度 80 km/h	

表 ７０　都市間高速道路トンネル火災時定風速化制御（2 km）

	排煙設備オン	排煙設備制御
概要		
車道内圧		
火点風速		
ジェットファン運転		
備考	交通量 2000 台/h　大型車混入率 30%　走行速度 80 km/h	

６－３－５　避難扉の関連

現状の避難扉は、1 枚構成のものと 2 枚構成のものがある。2 枚構成のものは、設置場所の構造的理由によって決められているようである。これを図 40 に示す。前記した扉の仕様（表 51 参照）によれば扉にかかる力は、783N（290Pa、W1350、H2000）程度の力が許容値となる。従って、扉を 2 枚構造にすると、例えば都市間高速道路トンネルの場合、引戸の面積は 1.77m^2（885 mm×2000）となるので 400Pa までが許容圧力となる。本検討の範囲では都市内高速道路トンネルでは最大 670Pa 程度までが想定される。それに対応する面積は、およそ 1.15m^2（W0.55×H2.0）となる。これに対応するためには図 39 に示す様に扉を２枚構成とし一枚目の扉の幅を 550mm にするような構造が可能であれば対応出来る。

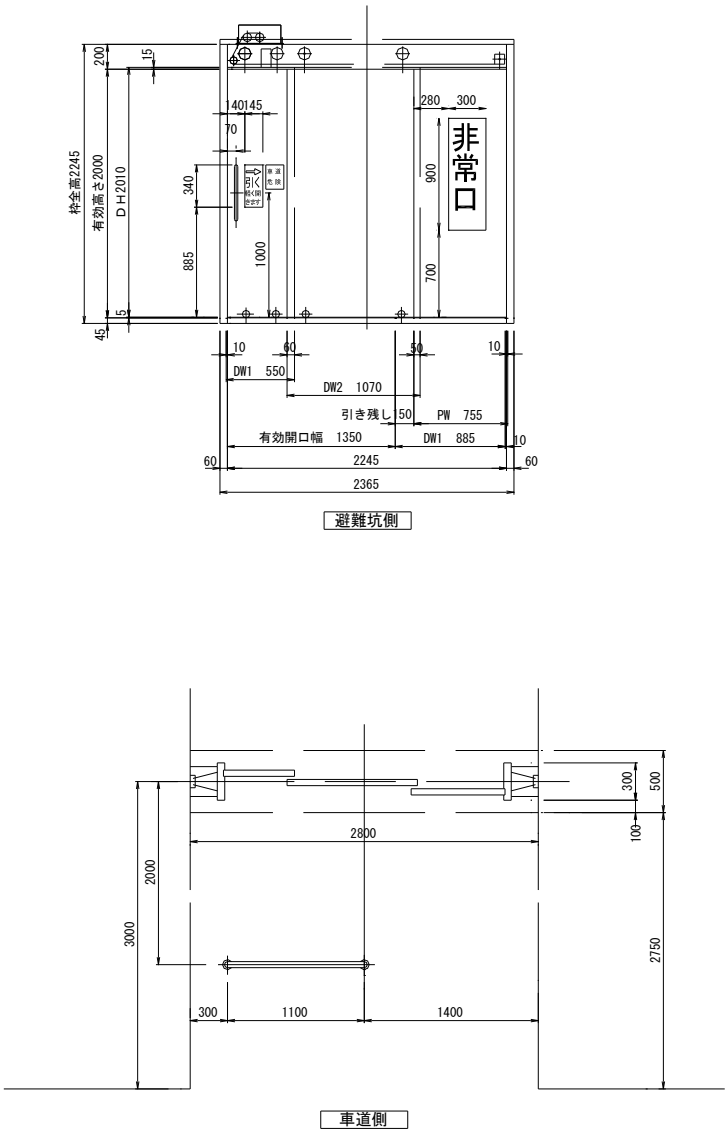


図　３９　高圧力に対応可能な扉構造の例

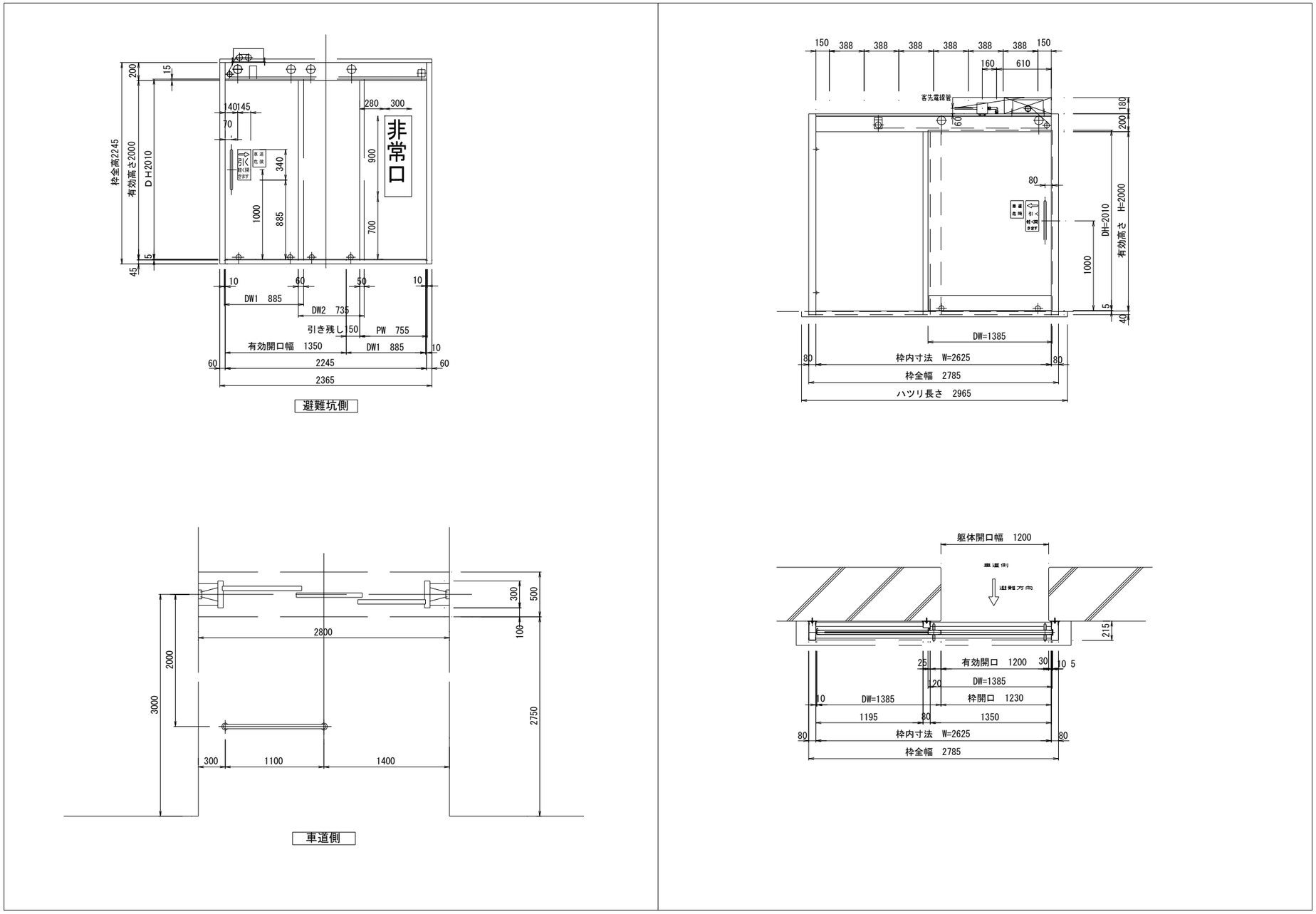


図 ４０　現状の避難扉の例

６－３－６　その他の課題と対応方法

都市内高速道路の長大トンネルは、トンネル内に分岐合流があることがひとつの特徴としてあげられる。トンネル内の分岐合流部は、風速零化に影響を与える。また、笹子トンネルの天井版落下事故により国内の横流、送気半横流のトンネルの天井板が撤去されている。特に送気半横流式は、一般道路トンネルが対面通行であるので排煙対策として採用されてきた経緯があり天井版撤去は、排煙機能が失われ避難環境に影響を与える。この他、最近長長大の都市トンネルの計画も進められている換気方式は、坑口集中排気縦流式が対象となるが延長が長いので中間に送排気設備との組合せとなる。このようなトンネルの風速零化は、この送排気設備が影響を与える。

（１）分岐合流部をもつ風速零化

最近、都市内高速道路トンネルの場合、トンネル内にランプが接続される等複雑な構造に縦流換気方式を採用する中で、交通の先詰りを考慮して避難環境を確保するために風速零化が行われる。この風速零化は、設置される換気機及びジェットファン等で行われるが、本線との分岐、合流部（ランプ等）の火災時に対応する換気機の規模や運用方法について注意が必要である。図４１に示すようなランプのある場合、たとえば火点 4 は、オンランプと本線の合流部の火災に相当する。

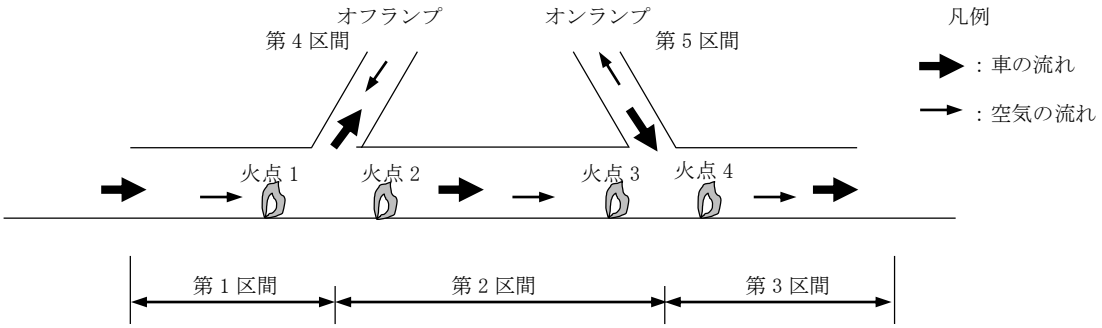


図　４１　ランプモデル

ここでの火災は、第 3 区間に設置されるジェットファンで対応するがそのときの流れは図４１に示す様に第 3 区間のジェットファンを逆転することにより第 2 区間の流れをオンランプ側に流すことで可能にしている。この方法であるとジェットファンは、少なくてすむ。このケースであると車両の存在が予想されるオンランプ側に煙が流れる可能性が高い、これを防ぐためには他の区間のジェットファンまで利用しなければならない。この一例を表 71 にしめす。

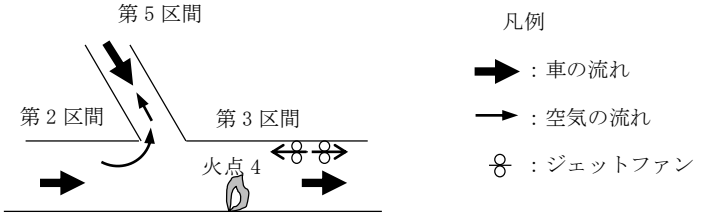
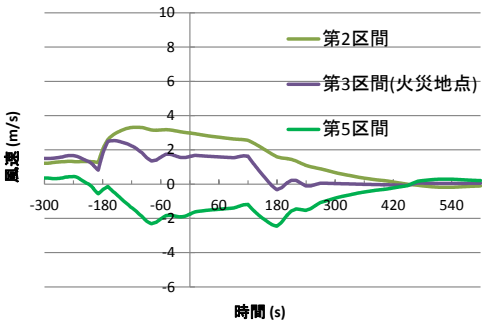
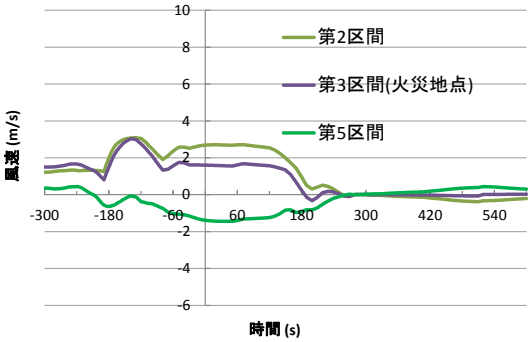
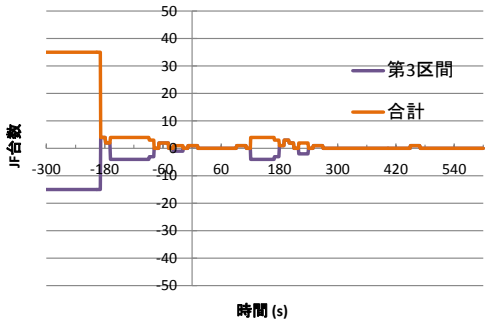
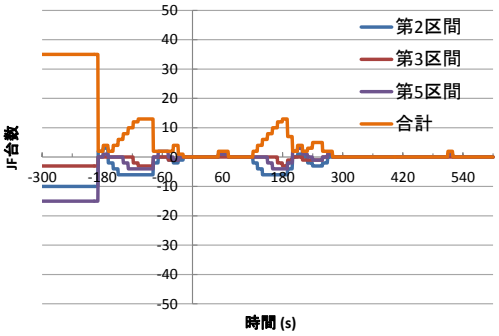


図　４２　第 3 区間のジェットファン利用の場合の車道内の流れ

表 71 は、トンネル延長 6 km、通常時の風速制御（流入風速コントロール）を行っている場合の一例である。

表　７１　風速零化運転一例

第 3 区間のジェットファンのみ利用	第 2、3、5 区間のジェットファン利用
	
	

第 3 区間のジェットファンのみを利用すると、煙が強くなる火災が発生しから 240 秒以前の風速を、火点（第 3 区間）の風速を零化することには対応できているが、それ以後 420 秒程度までは、第 5 区間の風速はランプ入口側へ流れる状況となる。これに対し、第 1、第 2、第 3 区間のジェットファンを利用すると 240 秒までにランプの風速も零にコントロールすることが可能である。

（２）長大トンネルの風速コントロール設備の低減

火災時風速をコントロールは、交通換気力、流れている空気の慣性力等に対抗するために大規模の設備を必要とする。交通換気力、慣性力は、交通方式、走行速度、大型車台数、トンネル延長に影響される。設備規模を提言させるためには、前記した影響を受けるものの中でコントロール可能な項目に注目対策を行えばよいことになる。

①交通換気力

一方通行トンネルの場合、出口側の火災に対し区間ごとに車両を停止させることが出来れば交通換気力の影響を小さく出来る（区間長により効果が異なる）ので設備規模を少なくすることが出来る。また、入り口側の火災に対しては、事故前方の車両に対しても速度を制限することや積極的なランプからの交通の排出により設備の低減を図れる。(交通コントロール)

②慣性力

慣性力の影響を避ける方法は、幾つか方法が考えられる。一つは、短絡流れの利用である。前期したランプ部の空気の流れを参考にすると、長い区間であれば中間に立て坑等換気坑（換気所換気ダクト）を設置火災箇所に合わせ開方することで短絡流れを起こさせることにより当該区間の設備規模の低減を図れる。二つ目は、送排気装置が設置される場合送気ノズルの直下を開放エアーカーテンとして利用する方法である。火災地点より前方に空気を供給することは抵抗が大きくなりゼロ化対策にもなる。

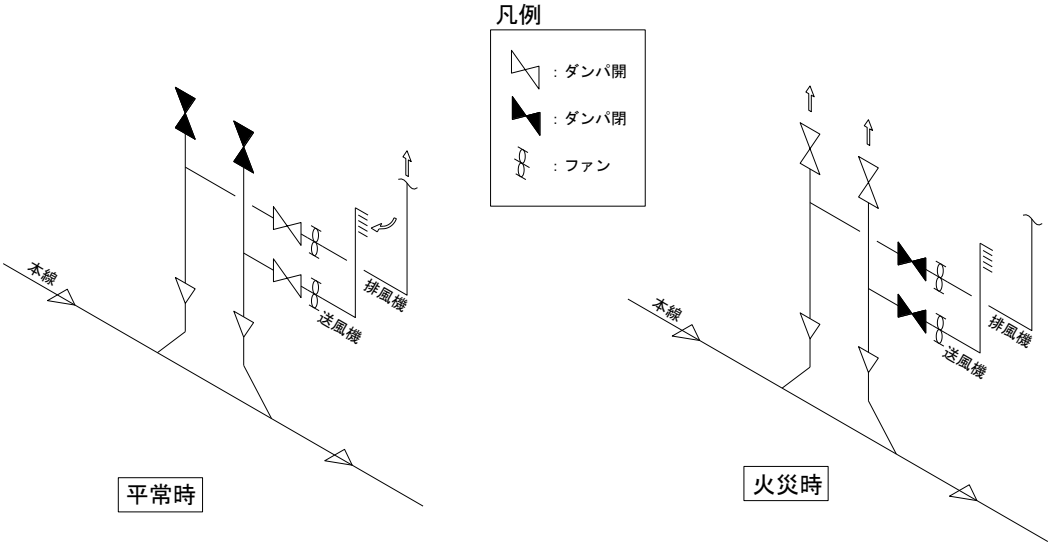


図　４３　換気所換気塔の利用

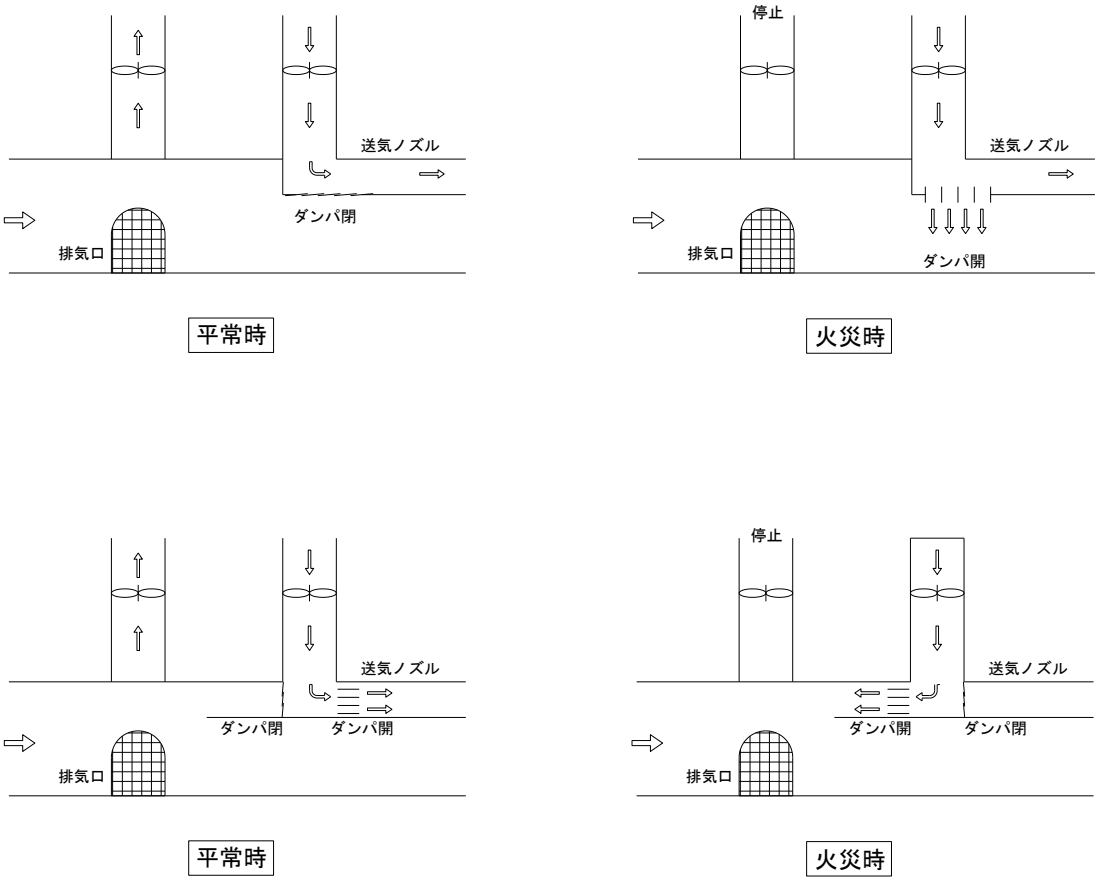


図　４４　送気ノズルを利用した慣性力抑止方法

（３）天井板撤去の影響

笹子トンネルの天井板落下事故以来各地に残された送気半横流のトンネルも天井板を撤去する方向にある。送気半横流式を採用する一つの目的は火災時の排煙にある。特に対面通行トンネルでは排煙機能が重要な役割をしている。ここでは、これから天井板を撤去した、或いはしようとしている 2500m 以上のトンネルについて排煙機能の有無について避難環境を比較する。

１）送気半横流式を採用する対面の通行トンネル

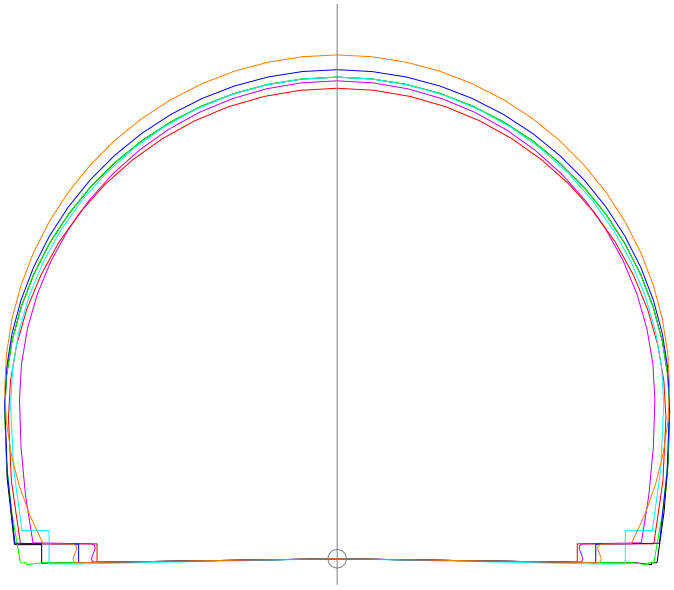
送気半横流式を採用する 2000m 以上のトンネルは、以下のとおりである。

表 ７２　トンネル延長 2000m 以上の送気半横流式トンネル（対面通行）

トンネル名	延長(m)	路線名	換気規模(m^3/s)	供用
矢ノ川トンネル	2076	国道 42 号	264	1973 年
夜昼トンネル	2141	国道 197 号	240	1972 年
東栗子トンネル	2374	国道 132 号	280	1997 年
仙岩トンネル	2540	国道 40 号	300	1944 年
遠阪トンネル	2778	播但有料道路	300	1977 年
月山第 1 トンネル	2660	国道 112 号	200	1980 年
西栗子トンネル	2675	国道 13 号	194	1967 年
日足トンネル	2765	国道 122 号	300	1978 年
御坂トンネル	2778	国道 137 号	480	1977 年
神山トンネル	2843	兵庫県道 94 号	398	1967 年
みちのくトンネル	3172	みちのく有料道路	3073	1980 年

注）両坑口換気所

これらのトンネルは、両坑口に換気所を有している。代表的トンネルの断面を示すと図４５のようになり天井高さは 6.4～6.8m、断面積は 47～52m^2 程度である。

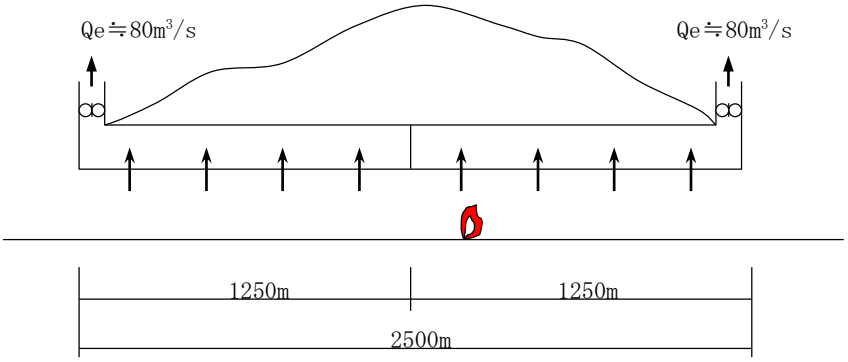


	高さ(m)	面積(㎡)	備　考
①	6.45	47.04	
②	6.35	47.51	
③	6.5	49.79	
④	6.5	49.82	
⑤	6.5	48.81	
⑥	6.6	50.31	
⑦	6.8	51.61	

図　４５　トンネル断面

これらのトンネルを代表して、トンネル高さ 6.5m、断面積 50m^2 として天井板付の送気半横流トンネルを逆転運転で排煙した場合と天井板なし換気設備なしの場合の火災時の車道内の状況を 3 次元シミュレーションにて検討を行った。なお、トンネル延長 2500m、排気量は送気を逆転することによる効率を考慮し 55%とした。

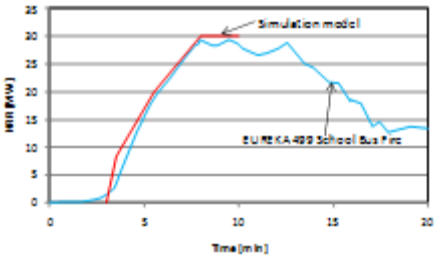
表６９の各トンネルの平均的な単位長さ当りの送気風量は、0.114（m^3/s/m）であるので、この 55%として 0.063（m^3/s/m）とした。



２）三次元火災シミュレーション

（a）条件設定

①　発熱速度：30MW



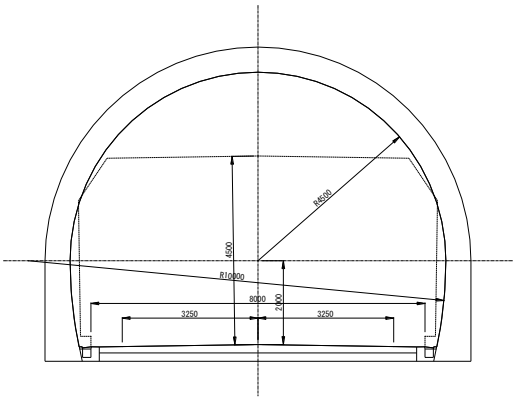
②　停止車両なし

③　火災地点風速零

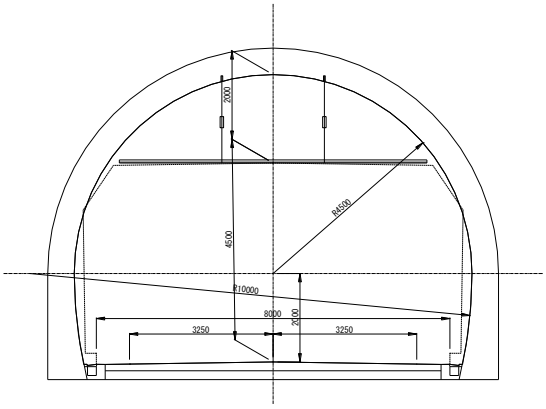
④　縦断勾配：零

⑤　対象断面

天井板無し



天井板有り（排煙）



トンネル内の煙の状況についての結果を以下に示す。この結果を整理すると以下の通りとなる。

①どちらも 10 分程度の範囲内ならば煙は、1.5m 程度を確保できる。縦流の場合は、煙が落ちにくい傾向にある。

②縦流の場合、煙の速度が排煙している場合より早いので避難開始する時間によっては煙に追いかけられている状態となる。縦流：0.8m/ｓ、排煙：0.5m/ｓ、10 分間の煙の範囲：縦流 500m、排煙：300m）

火災覚知からバスからの降車時間を 120 秒見込むと、最終避難者は 240s 後となる。最終避難者の位置と煙の先端の位置は、表 73 のとおりである。

表 ７３　煙の先端位置と最終避難者の位置

時間	人の位置(m)	煙の先端(m)		備考
		排煙あり	天井板なし	
240s	0	90	100	走行速度 1m/s 最終避難者：火災覚知後 240 秒後に避難開始
300s	60	150	200	
360s	120	200	350	
480s	240	260	405	
600s	360	305	510	

一般的に煙は、10 分程度天井部に留まり、それ以降は壁面の吸熱により降下してくるので天井板なしの場合は、速度を早めるか、もっと早く逃げ始めるかしないと煙に巻き込まれる可能性が高い。

表 ７４　天井排煙による煙分布

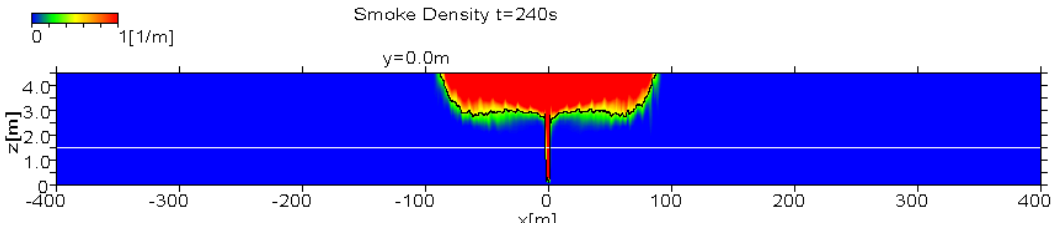
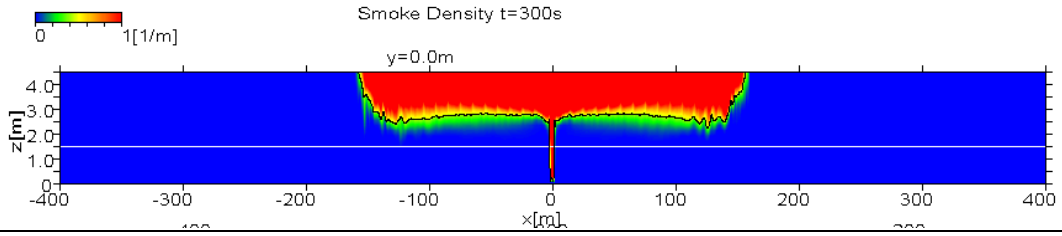
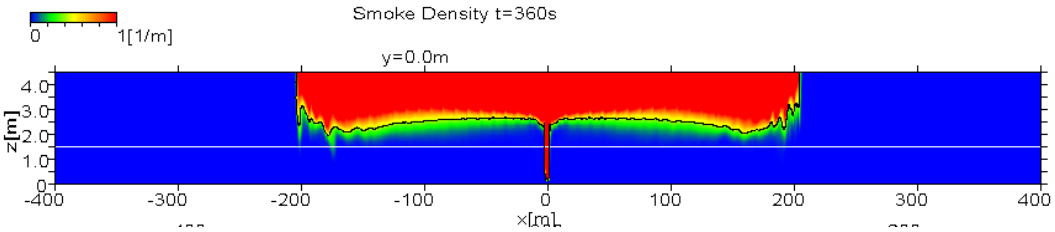
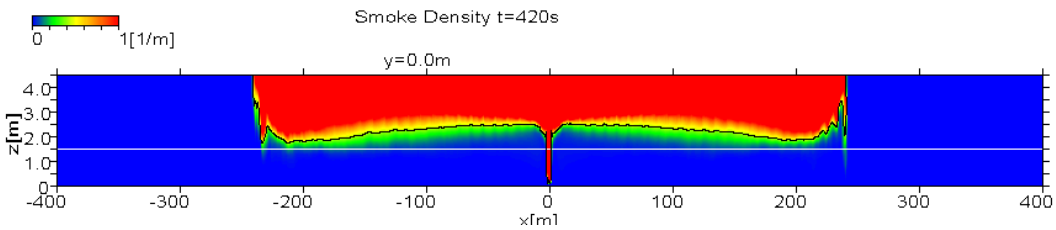
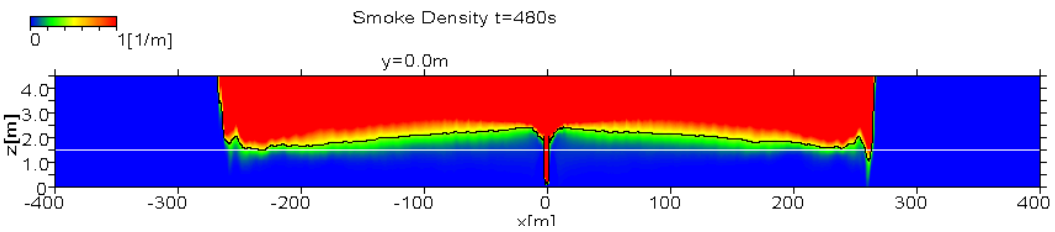
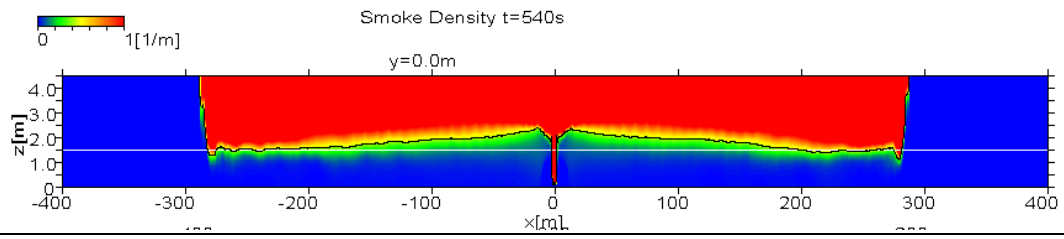
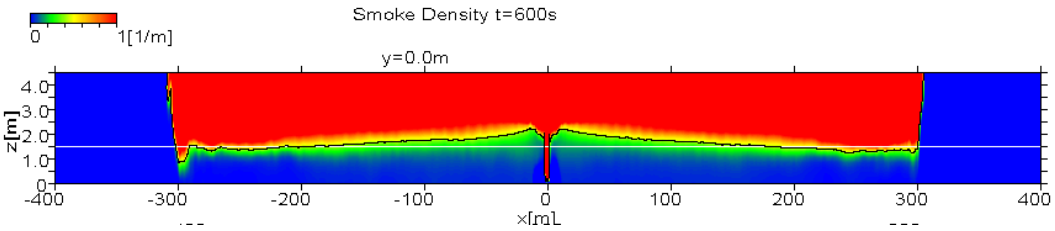
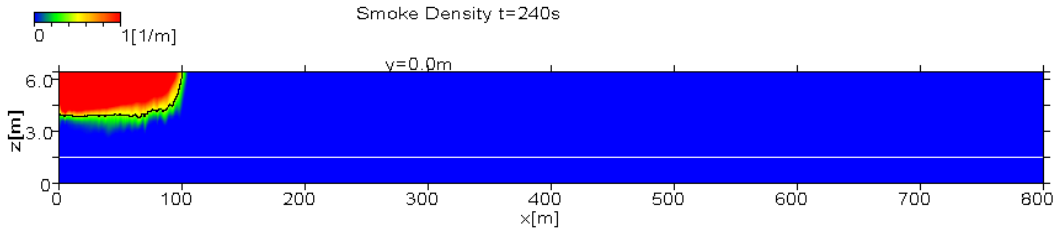
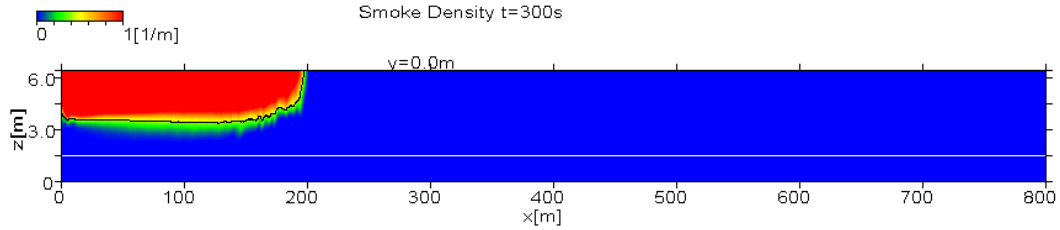
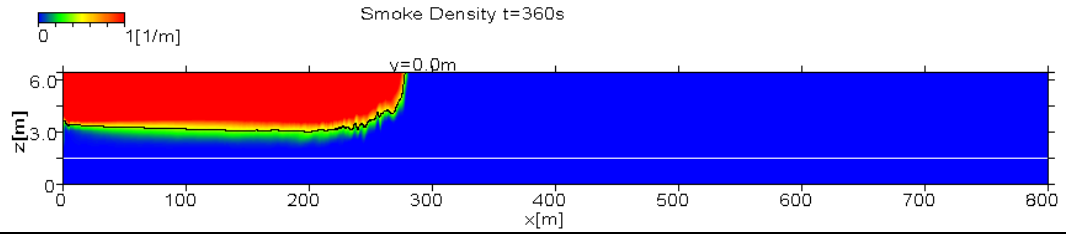
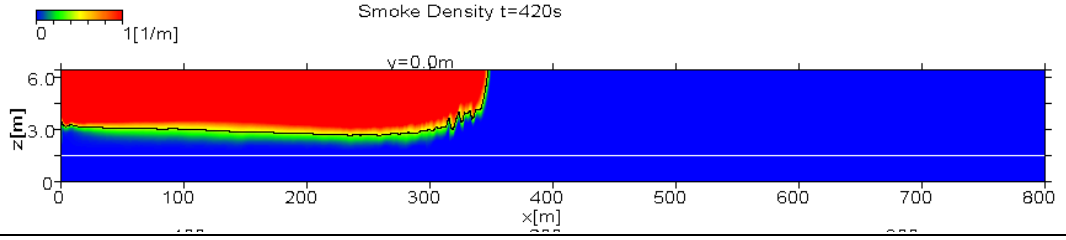
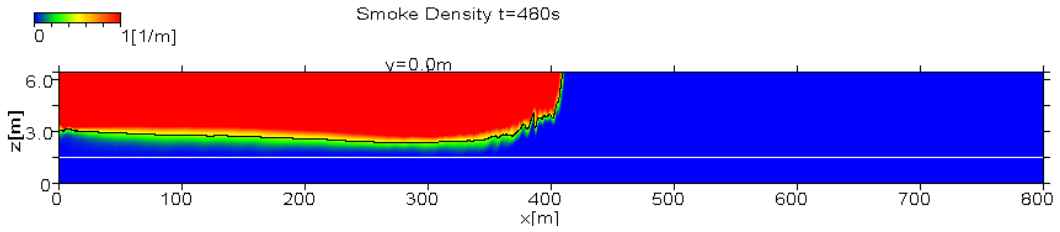
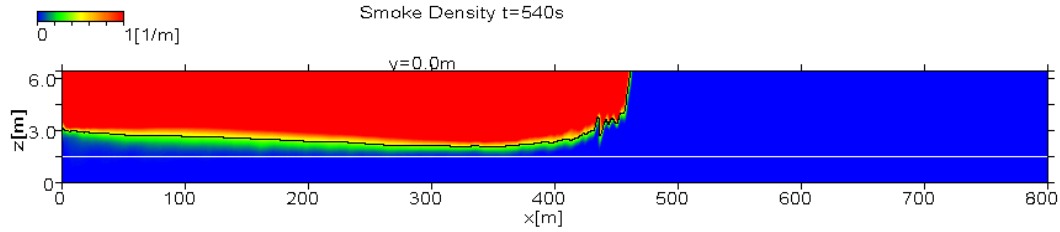
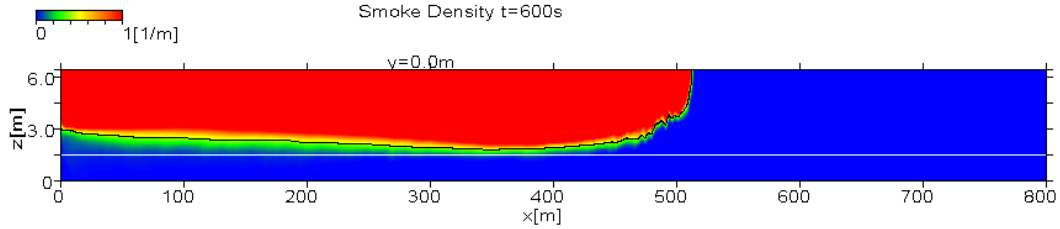
Time	Cs 濃度分布図
t＝240s	
t＝300s	
t＝360s	
t＝420s	
t＝480s	
t＝540s	
t＝600s	

表 ７５　天井板なしの煙分布

Time	Cs 濃度分布図
t＝240s	
t＝300s	
t＝360s	
t＝420s	
t＝480s	
t＝540s	
t＝600s	

７　結論

７－１　日本の道路トンネルの換気方式

日本の道路トンネルの換気方式は、都市間高速道路トンネル、都市内高速道路トンネル、一般道路トンネルに分けられそれぞれの背景のもとに発展してきた。都市間高速道路トンネルは、経済の発展と共に日本全体に路線が拡大することにより数多くの長大トンネルが想定され、関門、東名・名神・中央高速道路の欧米で採用した横流・送気半横流の換気方式の採用から車両の走行エネルギーを有効に利用する経済的な縦流式の検討が始められた。そして、大型車が殆どディーゼル機関である日本の道路トンネルでは、換気の対象物質である煤煙で換気規模が決められ、急峻な山間部と国・公立公園の中で空気を入れ替える換気坑（立・斜坑）を計画し工事をしなければならない現実からトンネル内空気中の煤煙を除去し空気を再利用する電気集塵機式縦流換気方式が開発された。これまでに、延べ 39 本のトンネルに採用され,電気集塵機処理風量は 16000m^3/s になる。

ジェットファン縦流式は、それまで換気設備が設置されていなかった奥田トンネル（L=630m）で交通量が増加することにより悪化した走行環境を改善するために 1966 年にドイツからの輸入品が設置されたのが最初である。

都市内高速道路トンネルは、重交通、トンネル内の分合流、環境対策等の特徴を持つため、換気の質の良い横流･送気半横流と坑口対策のため排気装置を持つ換気方式が採用されてきている。トンネル内の渋滞走行による交通換気風の不足、分合流部の交通流と空気の流れの配分が不明等課題が多く、2010 年に供用された山手トンネルまで横流式が採用されていた。

一般道路トンネルは、対面通行であり交通量も少ないので 2000m 程度以上のトンネルは火災時の排煙を考慮して送気半横流式が採用されていた。また、それ以下のトンネルはトンネル中央から排気する集中排気式の数も多く、交通の方向別比率に応じて可逆運転の可能なジェットファン縦流式も多い。

自動車社会は、外部環境に影響を与え日本各地で大気汚染訴訟が起こされ 1900 年代中頃に住民と国や公団の和解が成立した。この結果を受け、排出源対策が行われるようになり、煤煙の排出量の規制が強化された。その効果が 2000 年を過ぎたころから顕著となった。現状では、換気量が 1970 年代の 20%程度以下となり、都市間高速道路トンネルは、機械換気を必要とするトンネルが減少し、対面通行の一般道路トンネルは 6km を超えるトンネルでジェットファン縦流式が採用されるようになってきている。また、都市内高速道路トンネルは、2000 年前後のヨーロッパの長大トンネルの相次ぐ火災事故の影響から煙を積極的にコントロールする風速零化対策を行う方針が立てられ、縦流換気方式の採用に当たっては専用の排煙設備が設置されるようになった。この設備が、渋滞対策にもなり分岐合流等複雑な構造に対する流れの解析も行われ都市間高速道路トンネルに遅れる事 30 年で長大トンネルに縦流式が採用されている。

このような、状況にある日本の道路トンネルの換気方式は、都市間高速道路トンネル及び一般道路トンネルではジェットファン縦流式、都市内高速道路トンネルでは環境対策のため坑口集中排気縦流式が主体となると想定される。表 76 に対象路線ごとの換気方式の目安を示す。

表 ７６　今後の道路トンネルの換気方式と対象延長の目安

都市間 高速道路	ジェットファン縦流式 8 km～9 km以下 送排気縦流式 9 km以上
都市内 高速道路	坑口集中排気縦流式 7～8 km以下 送排気付坑口集中排気縦流式 8 km以下
一般道路	ジェットファン縦流式 7 km以下 集中排気縦流式 7 km以上

これらの換気方式に対する換気計画上の課題として、

① 都市間高速道路トンネルの排煙設備の設置方法

② 都市内高速道路トンネルの自然換気対応可能なトンネルの坑口集中排気方式の省資源、省エネ対策

③ 都市間高速道路の暫定二車及び一般道路の長大トンネルのジェットファン縦流換気の採用についての省資源、省エネ対策

を挙げたが、それぞれ換気設備だけではなく土木構造を含む提案を行った。(図 18、図 20、図 22、図 23 参照)

以上の結果を整理したものを表 77 に示す。

表 ７７　縦流化に伴う課題と対策方法　その１

	課題	対応方法	備考
都市間 高速道路 トンネル	・排煙設備 （ジェットファン）	・本体構造との兼ね合い （落下防止策）	・不要施設の利用含む （主な対応策として実験等が進められている）
都市内 高速道路 トンネル	・集中排気方式と経済性 ・風速零化制御の設備規模	・排風量の減少対策 ・排気風量の再利用 ・トンネル内の交通制御	・車道内の温熱環境に注意が必要 ・渋滞対策のチェック
一般道路 トンネル	・長大トンネルのジェットファン縦流式の採用と制御 ・排煙機能削除（半横流式の天井板撤去） 〔煙の広がる範囲の拡大速度が早い〕	・避難通路を利用した換気方式 ・避難通路の設置 ・避難速度を保つ設備 （足元灯）の設置	・都市間高速道路トンネルの暫定二車供用含む

７－２　換気設備と避難施設と縦流化に伴う課題

縦流換気方式の採用が進むなか従来排煙設備は、火災規模、燃焼の形態等不明の点が多く換気設備の範囲内で対応することを原則としていた。しかし、換気設備規模は減少する方向にあり専用の排煙設備を設置して積極的に煙をコントロールすることにより避難環境を考慮した計画が行われて来ている。避難施設の計画も都市間高速道路トンネルと、都市内高速道路トンネルでは表34、35に示す様に立地条件、交通条件、トンネル施工法等で異なる。本研究では、一方通行トンネルの縦流風をコントロールするだけでなくその際の車道内の圧力について着目した。

（１）都市間高速道路トンネル

都市間高速道路トンネルは、火災を覚知すると同時に排煙設備を起動させている。この排煙設備は、自然風による抵抗分を見込んで規模を決めているので順風の場合車道内風速は、目標としている縦流風の２倍となる4m/s程度になる。トンネル延長8kmの恵那山トンネルが自然換気の範囲に有り排煙設備のみが設置される状況から８ｋｍを最長とし2、4、6、8kmを対象に表40に示すシナリオを基に火災事故地点を入り口部、中間部、出口部について表41、43の条件で車両が停止した場合の影響についてシミュレーションを行うとトンネル出口側の火災事故で車両が停止することにより車道内圧力が高くなり延長が長くなるほど高くなる。結果を表46に示すがトンネル延長8km,交通量2500台/h、大型車混入率20%で一時的であるが最大460(Pa)の値を得る。

また、都市間高速道路トンネルの避難施設は、図24、26に示す避難通路又は反対車線と発災車線を結ぶ避難連絡通路となる。この避難連絡通路が解放された場合の影響を8kmのトンネルの出口火災を対象にシミュレーションした結果を表52、53に示す。この結果によると避難連絡坑内に2～4m/sの風速が避難通路または反対車線に流れることになる。

（２）都市内高速道路トンネル

都市内高速道路の長大トンネルは、坑口集中排気縦流式を採用し、火災時には風速零化制御を行うことが想定される。また、通常時の換気に補助設備として多くのジェとファンが設置されることが想定される。大型車混入率 20%,25%,30%で設計交通容量を対象にトンネル延長 4、6、8km とした場合の換気系と換気規模を表 43 に示す。この規模を基に車道内圧を求めると表 48、49 に示す様に零化の影響で正圧ばかりでなく負圧も生じている。また、出口側の火災の方が零化に必要な設備規模が大きくなるので範囲が広く影響も大きい。

都市内高速道路トンネルの避難施設は、トンネル工法（シールド）とも関連し同一トンネル内に計画されることが多い。ここでは、反対車線が避難通路で避難連絡坑が解放された状況の空気の流れを表 54 に示す。結果は、零化に対するジェットファンの運転により避難連絡坑の風速は波打つことが認められる。

この他、風速零化の設備規模が非常に大きくなることが認められる。

以上のように火災時の交通停止や換気機の運転による車道内圧力の変動、避難扉解放の影響、零化の設備規模等について検討してきた。いずれも、延長が長くなる程避難扉の開閉、避難通路や反対車線、他設備への影響等が考えられる。

７－３　車道内圧、避難扉解放、零化設備規模への対応策

（１）都市間高速道路トンネル

都市間高速道路トンネルに設置される避難扉の標準仕様は、開口扉面積 2.7m^2 に対し 290(Pa)以内の圧力で容易に開閉できることとしている。避難扉の設置される避難連絡坑の構造上の理由から扉が 2 枚構成となっており最初に開ける扉の面積から 440(Pa)程度まで対応可能と思われる。従って、都市間高速道路トンネルの避難扉の開閉については本報告試算の条件の範囲なら大きな問題は生じない。

ただ、出来るだけ圧力を抑えるためには、坑口ばかりでなくトンネル内の交通制御、定風速化制御等が必要となる。

交通制御の必要性については、表 59 に示す様に坑口規制により大幅に減少することが分かりトンネル内で制御出来れば表 61 に示す様な値で収まる。

また、表 68 に示す様に定風速化制御を行うことによっても圧力は低下させることが出来る。この定風速化制御は、縦流風を 2m/s にする制御方法なので火災事故地点下流側の煙を拡散させず事故により火災地点下流側に車両が停止するような状況が生じても避難環境を守ることが可能となる。

避難扉の開放の影響に対しては、避難通路の場合、火災時避難通路の両坑口の扉を閉鎖する事が必要となる。また、反対車線を利用する場合避難通路としての利用を含め表 64、65 に示すように発災車線と同時に排煙用設備を運転することが望ましい。トンネル全体をカバーするためには排煙用設備を両坑口に設置し表 65 に示すようにお互いにトンネル内に向けて運転することによりある時間が経過すると達成できる。

（２）都市内高速道路トンネル

都市内高速道路トンネルの場合、出口坑口に排気装置が設置されていること、風速零化制御のための換気機運転が火災地点と離れた場所で行なわれること等から表 62 に示すようにトンネル内で車両の制御を行なっても最大正圧は変わらないが、表 31 に示すように零化に必要なジェットファン台数が大きく変わるので負圧に大きな差が生ずる。都市内高速道路トンネルの避難通路は、発災トンネル内に設けられることが多く避難通路用の換気施設が設置され煙の侵入を防ぐために加圧しているのでトンネル延長が長いと加圧力によっては構造上の仕様圧力を超えることも想定する必要がある。また、全体的に圧力が高いので、扉の開閉に対する対応として 2 枚構成にすることも考慮する必要ある。都市内高速道路トンネルで反対車線を避難通路として利用する場合、風速零化のための設備が両坑口に設置されているので表 66 に示すように出来れば発災側トンネルと同時にトンネル内に向けた運転を行なうことが望ましい。

これまでの結果を整理すると次のようになる。

①トンネル内で火災が発生すると車道内圧力が上昇する。

②圧力は、トンネル出口側の事故ほど、トンネル延長が長いほど高い。

③都市内高速道路長大トンネルの場合風速零化の影響で大きな負圧が生ずる。

④発災側の車道内圧力が高くなることにより、扉が開放されると避難通路又は、反対車線に向けた流れが生ずる。

⑤これらの現象に対応するためには、トンネル内の交通制御を行なうべきである。少なくとも坑口からの進入はなくすべきである。トンネル内交通制御を行なうと

・都市間高速道路トンネルでは、トンネル内圧力が大幅に減少する。

・都市内高速道路トンネルでは、正圧は変わらないものの零化の設備規模が大幅に少なくなり零化により生ずる大きな負圧がなくなる。

⑥都市間高速道路トンネルの場合、避難扉が 2 枚構成となっているのでほぼそのままで対応可能である。（試算の条件の範囲）

⑦都市内高速道路トンネルの場合零化のために交通制御を行なっても全体に圧力が高くなるので避難扉の容易な開閉のために構造を変えるか通路内の圧力を高くする必要がある。

⑧都市間高速道路トンネルでは、火災時排煙機はオンのみとなるが、定風速化制御を行なうことで圧力の低下、事故による火災地点下流側に車両が停止した場合でも避難環境の確保が可能となる。

⑨避難扉の開放に関しては、

・都市間高速道路トンネルで避難通路を利用する場合は、火災と同時に避難通の両坑口を閉鎖する事を考慮する必要がある。反対車線を利用する場合、発災側の制御と同時に反対車線の排煙設備の運転を行なうことが望ましい。状況を確実にするためには、出口側にも排煙設備を設置しトンネル内に向けた運転を行なう方法がある。

・都市内高速道路トンネルは、零化設備が両坑口に設置されているので発災側と同時に火災地点に向けた換気機の運転を行うことが望ましい。

以上の結果を表 78 に示す。

表 ７８　縦流化に伴う課題と対策方法　その２

<table>
<tr><th></th><th>避難方法</th><th>排煙設備</th><th>避難通路換気</th><th>影響</th><th>課題と対応策</th></tr>
<tr><td rowspan="2">都市間
高速道路
トンネル</td><td>避難通路</td><td rowspan="2">有</td><td rowspan="2">無</td><td rowspan="2">延長が長くなると出口側火災時に車道内圧力が上昇(火災発生地点より手前車両の停止位置により移動)</td><td>・避難通路開閉構造⇔圧力チェック
⇔扉の構造(できれば定風速化制御)
・トンネル内交通制御
・避難扉開放⇔影響チェック
⇒避難通路坑口、扉の設置：開閉</td></tr>
<tr><td>反対車線</td><td>・避難通路開閉構造⇔圧力チェック
⇔扉の構造(できれば定風速化制御)
・避難扉開放⇒反対車線排煙機運転</td></tr>
<tr><td rowspan="2">都市内
高速道路
トンネル</td><td>避難通路</td><td rowspan="2">有</td><td>有</td><td rowspan="2">零化制御のためトンネル内全体の圧力上昇、負圧も生ずる</td><td>・避難通路換気の条件(車道内圧力)
・負圧が生ずるので避難通路との圧力チェック
⇕
トンネル内交通制御</td></tr>
<tr><td>反対車線</td><td>無</td><td>・避難通路の開閉⇔圧力チェック
⇒扉の構造
・避難扉の開放⇒反対車線の零化設備の運転(トンネルの火災地点前後)</td></tr>
<tr><td>備　考</td><td colspan="5">・排煙設備の設置位置、規模が決定後、圧力チェックが必要
・特に零化対策を行う場合、同時起動台数、利用するジェットファン位置により圧力分布が異なることに注意が必要
・トンネル内で車両の停止ができる工夫が必要(圧力の影響、設備規模が大幅に減少)
・圧力をチェックし、避難者との位置関係を把握するともに現象を把握する。</td></tr>
</table>

日本の道路トンネルに採用された換気方式とその経緯、今後の方向性と適用範囲について整理した。また、今後進んでいく縦流換気方式の課題を抽出し対応策について検討を行なった。ただし、限られたケースなので個々のトンネルには具体的な条件を基に検証する必要がある。たとえば、トンネル断面、ジェットファンの設置位置及び運用する位置、ジェットファンの同時起動台数等によっても車道の状況が変わる。また、何時、どの場所で避難するかという避難行動についての研究を進めることにより具体的な対応策が立案できる。

参考文献

[1] Permanent International Assosiation of Road Congresses,Report of Techinical Committee on Road Tunnels (1979)

[2] 日本道路協会、道路トンネル技術基準（平成20年度版） （平成20年）

[3] Joseph P.Flynn Senior Tunnel Equipment Supervisor Holland Tunnel : “National Engineer Ventilation at Holland Tunnel”(Feburuary,1948)

[4] “A year’s Operating Experience With the Holland Vehicular December ” :ENGINEERING NEWSRECORD(1928),P942-P949

[5] 六角康久、土肥孝政「昭和33年」、「関門国道トンネル換気装置」、「日立評論」、第40巻第4号 P1～P9

[6] 葛西泰二郎「昭和32年」、「関門トンネルの換気装置と送風機」、九州大学：第34期通常総会講演会資料

[7] 比留間豊、中道文基「1962年」、「名神高速道路トンネル（天王山トンネル）の半横流式換気方式による換気装置の設計まで」、「高速道路と自動車」、Vol.5 No.9 P23-P30

[8] 稲見悦彦、中道文基「昭和45年」、「トンネルの設計」東名高速道路建設誌編さん委員会、「東名高速道路建設誌」、日本道路公団

[9] 河村他ジェットファン試験調査委員「昭和41年」、「奥田トンネル換気設備（ジェットファン）試験調査報告書」、日本道路公団技術第一課、高速道路調査会

[10] 河村他立坑送排気研究班「昭和51年」、「立坑送排気縦流換気方式に関する調査研究報告書」、高速道路調査会

[11] ホームページ、日本高速道路保有・債務機構 http:/www.jehdra.go.jp/

[12] 今田他トンネル集じん便覧委員「昭和54年」、「道路トンネル集じん便覧」、建設電気技術協会

[13] T.Baba,H.Ohhashi, F.Nakamichi, E.Inami,I.Akita : ” Recent Trends in Ventilation Systems of Long Tunnels in Japan ”,AERODYNAMIC＆VENTILATION OF VEHICLE TUNNELS Recent Trends in Ventilation Systems of Long Tunnels in Japan Lille,France:20-22 May,1985

[14] 首都高速道路技術センタ、トンネル換気設計基準に関する調査研究報告書（トンネル換気設計指針案）（昭和59年）

[15] 日本道路公団、関門トンネル工事誌、関門トンネル工事誌編纂委員会 （昭和35年）

[16] 日本道路公団、名神高速道路トンネルの換気量及びその算定基礎（総括編）（1960）

[17] 日本道路公団、トンネル換気設計要領 （1964）

[18] 高速道路調査会、トンネル換気設計指針 トンネル換気分科会 （1969）

[19] 日本道路協会、道路トンネル技術基準（案） 道路トンネル技術基準調査特別委員会（昭和47年）

[20] 日本道路協会、道路トンネル便覧 （昭和50年）

[21] 首都高速道路協会、トンネル換気設備資料調査研究報告書（トンネル換気設計指針）（昭和51年）

[22] 日本道路公団、設計要領第三集９編（2）トンネル換気 （昭和53年）

[23]　日本道路協会、道路トンネル技術基準（換気編）・同解説　（昭和60年）
[24]　首都高速道路技術センタ、トンネル換気設計指針に関する調査研究報告書（トンネル換気設計指針案）　（平成5年）
[25]　日本道路協会、道路トンネル技術基準（換気編）・同解説　（平成13年）
[26]　首都高速道路公団、トンネル換気設計指針に関する調査研究報告書（トンネル換気設計指針案）　（平成15年）
[27]　東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱、設計要領第三集トンネル（2）トンネル換気　（平成18年）
[28]　東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱、設計要領第三集トンネル（2）トンネル換気　（平成21年）
[29]　首都高速道路㈱、機械設備設計要領（トンネル換気設備編）（平成26年）
[30]　村山朔郎「昭和28年」、「トンネル内における機関車煤煙の衛生学的考察」、土木学会論文集16号　P44～P51
[31]　May,J.:Beziehungen zwischen Kohlenoxydkonzentration der Luft und Kohlenoxydh e moglobingehalt des Blutes;Archiv fur Gewerbepat hologieund Gewerbehyglene, Berlin, Julius Springer Verlag ,　1941年
[32]　日本道路公団　自動車の排気ガス（煤煙を含む）調査試験報告(昭和34年)
[33]　日本道路公団、設計要領第三集９編（2）トンネル換気　（平成9年）
[34]　伊達英夫,鈴木幾雄「1977」、「トンネル用集塵機の実用化」、高速道路と自動車 Vol. XX No.7
[35]　日本道路公団　設計要領第三集　（事務連絡）1979年
[36]　日本道路協会　トンネル非常用設置基準（案）　1981年
[37]　Takanori Hakozaki,Jun Ishitoya,Yasuhiro Mikame"Temperature rise factors and measures in Yamate tunnel"[The 6th Taiwan/Japan/Korea Joint Seminar for Tunnel Fire Safety and Management] (2014)
[38]　Hirotaka Yanagi,Takuma Sakaguchi,Tomoki Kikumoto"Theoretically-derived formula of water flow rate for duct cooling system"[The 6th Taiwan/Japan/Korea Joint Seminar for Tunnel Fire Safety and Management] (2014)
[39]　高速道路調査会、長大トンネル特設委員会報告書　（昭和52年）
[40]　日本機械学会　管路ダクトの流体抵抗　2001年
[41]　H Ynagi,H Tomura,A Mizuno “Analysis of dynamic characteristics of a selective exhaustion system in tunnel ventilation” [Aerodynamics and ventilation of vehicle Tunnels] 12th International symposium(2006)
[42]　交通部国道高速公路局、雪山隧道南下26K交通事故火焼車事件検討報告（初稿）2013年

参考資料Ａ　雪山トンネルの火災事故

2012 年 5 月 7 日午後 1 時 30 分頃、アジアで二番目に長い道路トンネル（2012 年現在）雪山トンネル（台湾：12.9 km一方通行）において 2 名が死亡し、34 名が負傷する火災事故が発生した。事故は、パンクし停止している小型貨物を避けようとした大型バスに乗用車が追突（このバスは、前方に押し出される）し、この乗用車に別の大型バスが追突炎上したものである。雪山トンネルは、一方通行トンネルであり火災時は反対車線に避難するための非難連絡坑 350 m間隔で設置されている。日本で想定しているバス火災程度の規模であり、その状況を把握し原因を研究することは、日本における今後の道路トンネルの防災を考える上で大いに参考になるものである。

そこで、火災事故の調査報告書[41]と現地調査を基に多数の負傷者を出した原因について解析を行った。雪山トンネルは、縦流換気を採用しており火災時縦流風を前流しすることで避難環境を確保し火災事故後方の避難者を避難連絡坑により反対車線に避難させる方法を採用していた。負傷者が多数出た原因は、火災が交通事故を端緒として発生し火災発生地点より前方にバスが停止していたこと、火災発生場所が出口側であったこと、避難扉が閉鎖しなかったこと、急、消火作業用の導坑扉の開放された煙が安全空間に流れ込んだことがあげられる。

（1）雪山トンネルの概要

1）全体概要

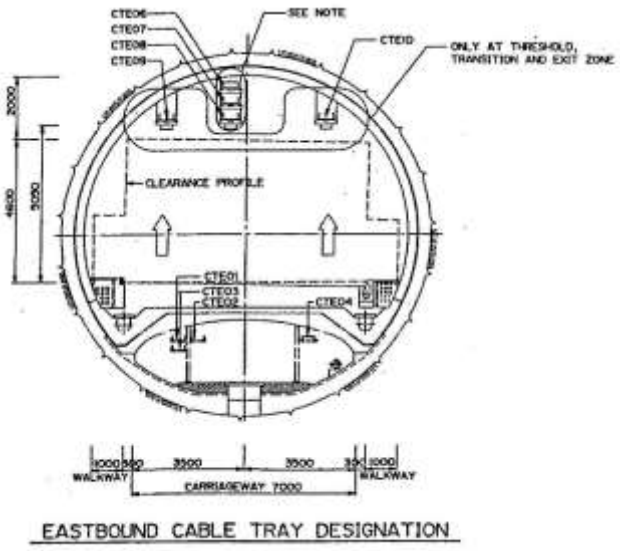
雪山トンネルは、2006 年世界で 5 番目の延長をもつトンネルとして台北-宜蘭間を結ぶ（National High Way No.5）一方通行トンネルとして供用された。1999 年のモンブラントンネル等ヨーロッパの長大トンネルの火災事故を受け当初は乗用車のみの運用としており現状ではバスまでを対象とした運用を行っている。本トンネルの施設や設備内容を以下に示す。

図 A-1　雪山トンネル位置図

表 A-1　供用中の世界の長大トンネル

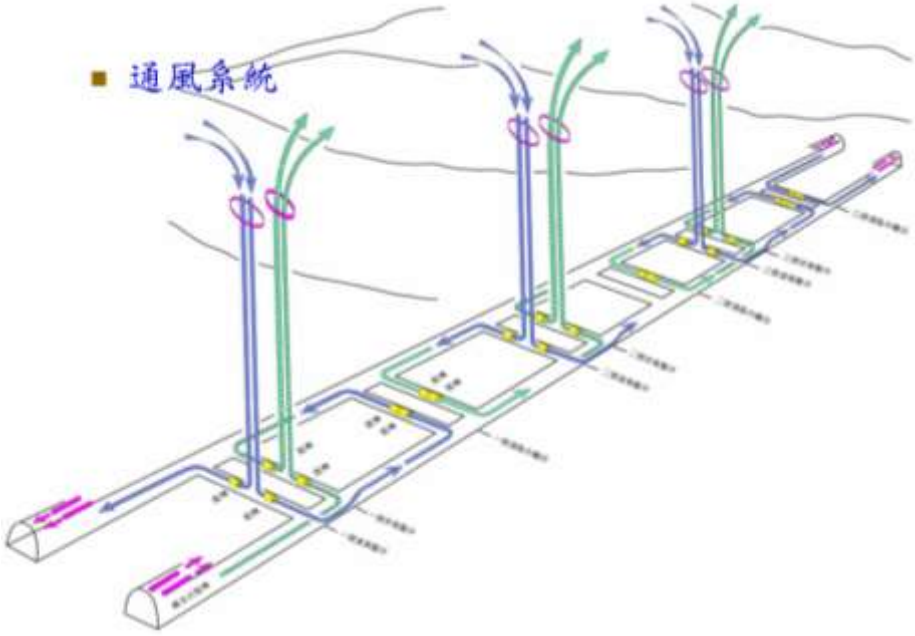
トンネル名	国名	延長(m)	交通方式	供用
Leardal	Norway	24510	対面	2000.11.27
Zhongman shan	China	18040	一方	2007.1.20
St Gottard	Switzerland	16942	対面	1980.9.5
Arlberg	Austria	15516	対面	1978.12.10
Snow Mountain	Taiwan	12942	一方	2006.6.16

２）トンネル計画条件

項目	内容
設計速度	80 km/h
トンネル延長	北上線：12.842 km(宜蘭→台北) 南下線：12.917 km(台北→宜蘭)
縦断勾配	i=1.255%(片勾配 台北→宜蘭)
交通方式	一方通行(2 車線 2 方向) 走行車線：右側、追越車線：左側
トンネル断面 標準部 非常駐車帯(1400m 間隔)	

３）施設及び設備の概要

雪山トンネルは、快適な走行、非常時に対する安全性等に配慮し、数多くの施設や設備が設置されている。

<table>
<tr><th></th><th>内容</th></tr>
<tr><td>換気施設</td><td>①換気方式：縦流式（送排気用立坑 3 ヶ所、ジェットファン）
 

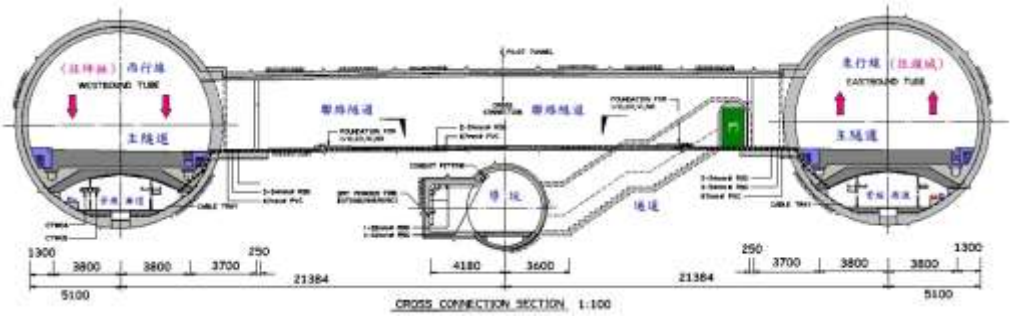
<table><tr><td>送排風機</td><td>各立坑 4 台計 24 台</td></tr><tr><td>ジェットファン</td><td>112 台</td></tr></table></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th></th><th>内容</th></tr>
<tr><td>安全施設等</td><td>

①避難施設

避難連絡坑

<table>
<tr><th></th><th>間隔</th><th>箇所数</th><th>備考</th></tr>
<tr><td>人道</td><td>350m</td><td>28</td><td></td></tr>
<tr><td>車道</td><td>1400m</td><td>8</td><td>非常駐車帶と対</td></tr>
<tr><td>導坑</td><td colspan="3">本線中間下部（全線）人道と接続</td></tr>
</table>



導坑：緊急避難用車両運行用

避難通路：避難連絡坑を利用反対車線

</td></tr>
</table>

（３）トンネル火災の概要

１）雪山トンネル火災事故

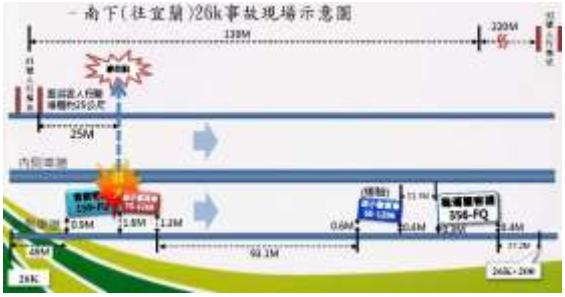
雪山トンネルは、2006 年 6 月 16 日に供用当初は、小型車のみの通行であったが現在は高速道路と貸切バス等大型乗合自動車が通行可能となっている。これまでに 8 件の火災事故が起きているが、火災規模とともに多数の負傷者を出したのは 2012 年 5 月 7 日に発生した。

２）2012 年 5 月 7 日トンネル火災の概要

(a) 事故概要

	内容
事故地点	南行線（出口坑口より 2 km）31 人道用連絡坑より南側 25m と 32 人道用連絡坑間
火災車両	乗用車 1 台、バス半焼
被害	死者 2 名（事故） 負傷者 34 名（煙の吸引による）

(b) 事故の詳細と対応

1.事故による被害 死亡：2名（車両事故による） 負傷者：34名 照明器具焼損 無線塔配線類 タイルの落下	
2.事故形態 ①パンク車の路線上で停止 ②パンク車後方2台の乗用車は、路線変更して避走 ③後方バス走行低下 ④バス後の乗用車にさらに後方のバスが速度低下せず（前方不注意）乗用車に追突 ⑤前方のバスとバスに挟まれ乗用車より発火 乗用車全焼、バス（後方エンジン部、燃料タンクを残し）焼損	
3.初期消火 13:24:23　発火発生 13:25:11　火災信号 ｝約5分 13:30　出動要請 ｝ 13:34:33　事故バス乗客確認（全員避難）｝約9分22秒 初期消火 13:46:14　新北市雪山消防分隊現場到着 本格消火 14:09:46　消火完了 計45分	

３）負傷者の出た原因

雪山トンネルは、一方通行トンネルで火災が発生した場合、一般的に車両がぞんざいしていることを想定していない。従って、換気機を運転し火災地点から煙が遡上しないように前方に縦流風を流すことを前提としている。このときの縦流風は、2m/s～4m/s 程度としている。（表参照）今回、火災発生が確認された直後火災モード運転が行われている。本葛西は、交通事故を原因として発生しており、その事故の関連で火災発生場所の前方に大型バスが停止しているという今まで考慮していないシナリオが発生した。火災が発生した時に車両から降車した乗客は、避難口から避難を始め避難連絡坑から反対車線へ避難することになっていたが、緊急車両の通路である導坑へ避難を始めた。このとき本坑の扉が解放されるとともに、導坑の扉も開放された。導坑は、両坑口が閉鎖されているが火災による緊急車両の通行のため一時的に解放されているが、火災による緊急車両の通行のため一時的に開放された。このために本坑と避難連絡坑、導坑は大気に解放された状態となり交通換気力、換気機運転による本坑内圧力上昇により煙が避難連絡坑や導坑ないに進入した。このために避難者は逃げ惑い最終的に、消防に救助されたが煙を吸い込み病院に搬送される結果となった。

図 A-2 は、火災発生地点と避難扉の位置関係と開放された扉の開放時間とその状態を示したものである。

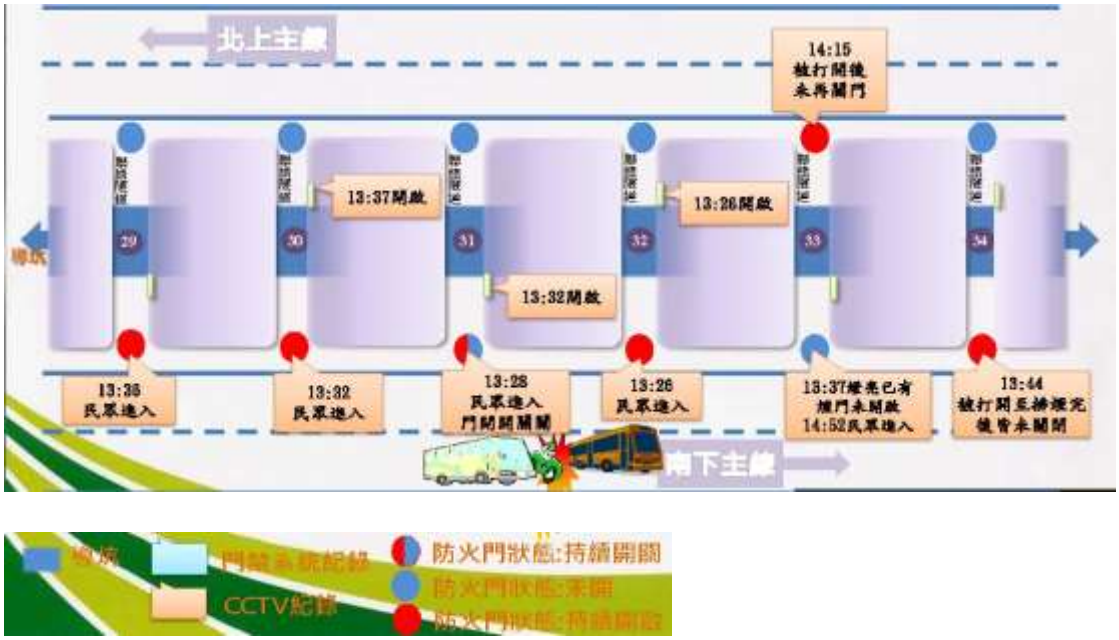


図 A-２　火災発生地点と避難扉の位置関係及びその状況

また、避難連絡通路及び導坑内の煙の状況を図 A-3～A-4 に示す。この状況から導坑は、緊急車両を通行させるため 2 度両坑口の扉が開けられたことが想定される。

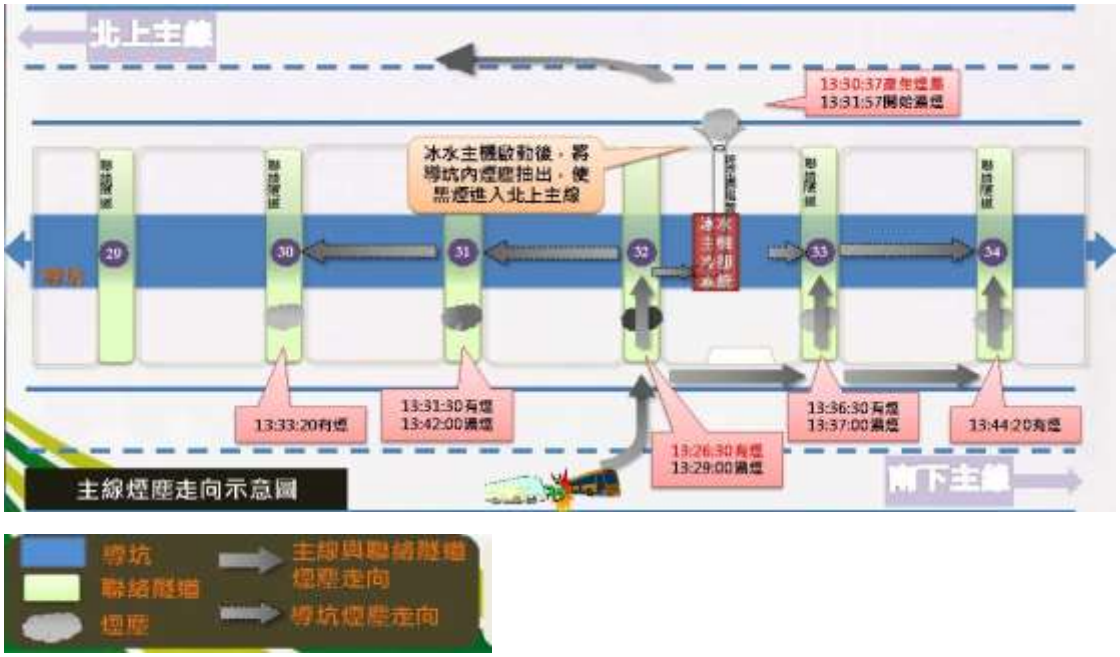


図 A-３　避難連絡坑内の煙の進入状況

図 A-４　避難連絡坑内の煙の進入状況

以上の結果を整理すると次のようになる。

①車両事故による火災地点前方に大型バスの停車

②車道内風速により火災地点下流側は、煙が拡散した。

③避難口より避難を始めたが押戸型の避難扉を押し切ったために、自動閉鎖せず開放されたままとなった。

④避難経路ではない導坑内への避難と避難連絡坑と導坑への扉も開放されたままとなり、同時に緊急車両の通行のために常時閉鎖されている両坑口扉が開けられ本坑、避難連絡通路、導坑が大気につながり風路となった。

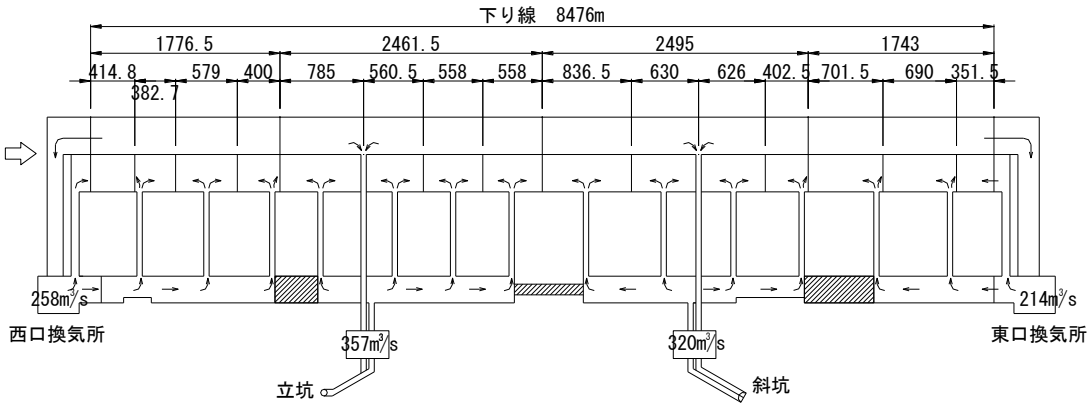
⑤その結果、火災地点下流値にある避難口から煙が避難連絡坑導坑内に進入避難者が煙を吸い込む原因となった。

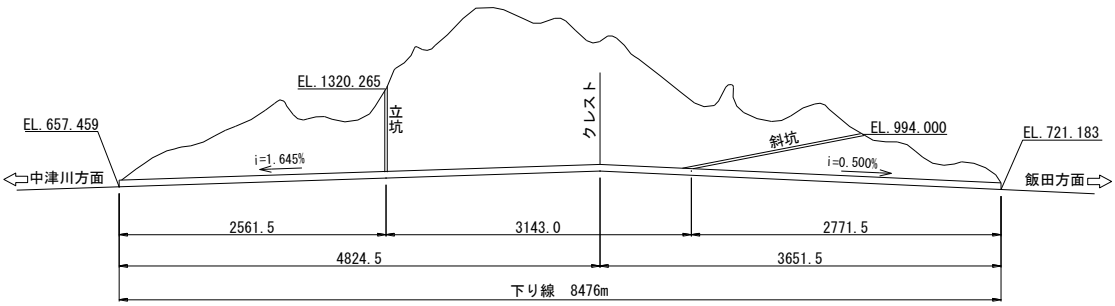
参考資料Ｂ　トンネルデータ

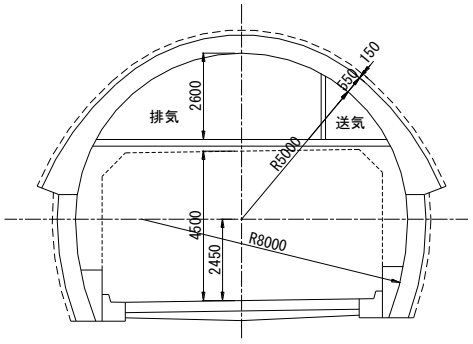
B-1　恵那山トンネル
B-2　敦賀トンネル　Ⅰ期線（上り線）
B-3　敦賀トンネル　Ⅱ期線（下り線）
B-4　笹子トンネル
B-5　新神戸トンネル
B-6　日本坂トンネル
B-7　今庄トンネル
B-8　清見寺トンネル

B-1　恵那山トンネル

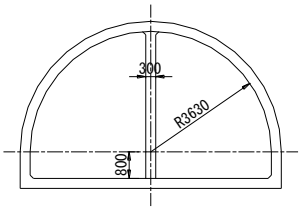
トンネル名	恵那山Ⅰ期線		
換気方式	横流	所要換気量	1200m^3/s
トンネル延長	8476m	計画交通量	1000 台/h
許容 CO 濃度	150ppm	許容透過率	50%　Pd＝22.3%
換気用ダクト	本坑：送気 3.38m^2、排気 12.64m^2　パイロット：12.89m^2 立坑 6.2mφ620m　斜坑：1547m		
車速	60 km/h	換気所	両坑口及び立坑、斜坑
その他	換気機(軸流) 西口：送気、排気各 2 台　東口：送気、排気各 2 台 立坑：送気、排気各 2 台　斜坑：送気、排気各 2 台		



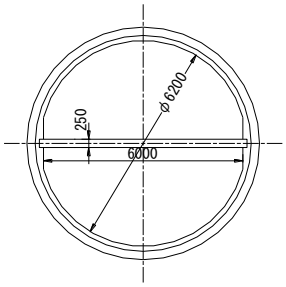




標準断面（下り線）



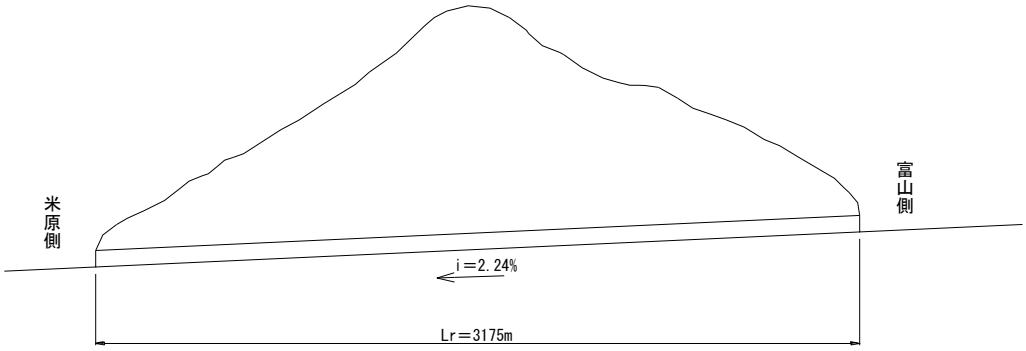
斜坑断面（下り線）

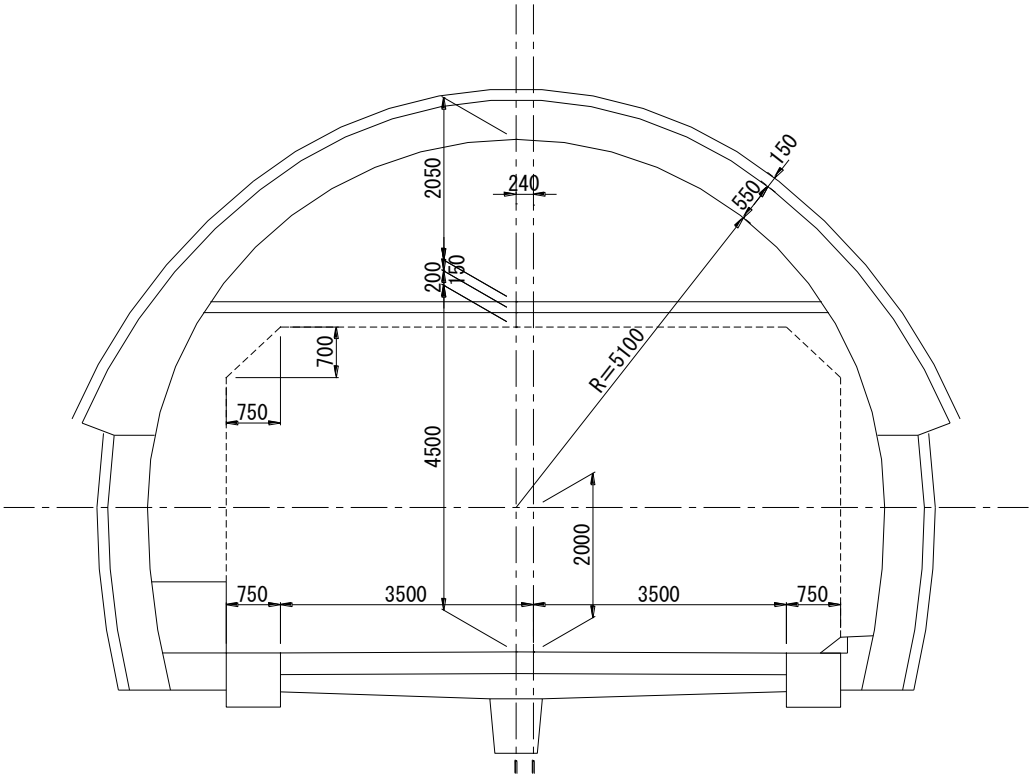


立坑断面（下り線）

B-2　敦賀トンネル　Ⅰ期線（上り線）

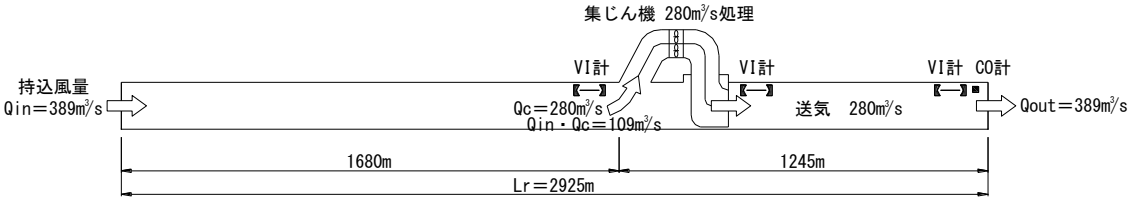
トンネル名	敦賀トンネル（上り線）		
換気方式	送気半横流換気方式	所要換気量	対面通行時：375m³/s 一方通行時：340m³/s
トンネル延長	3175m	計画交通量	対面通行時：1442 台/h 一方通行時：1689 台/h
許容 CO 濃度	150ppm	許容透過率	50%　Pd＝22.3%
換気用ダクト	本坑　11.7m²　2.7m		
車速	80 km/h	換気所	両坑口
その他	換気機(立流)軸流電動機内装直格型： 西口、東口：2500φ　2 台　215KW　上下線連絡坑有り：3 ヵ所		

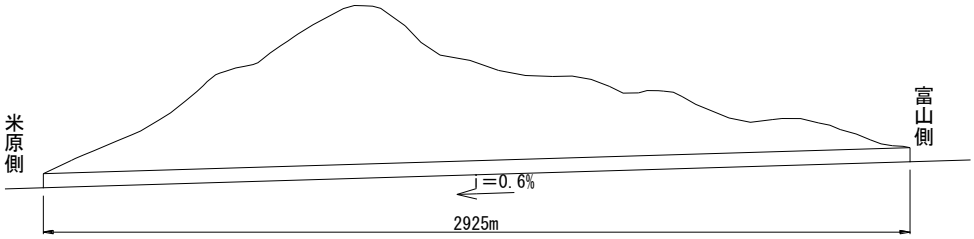


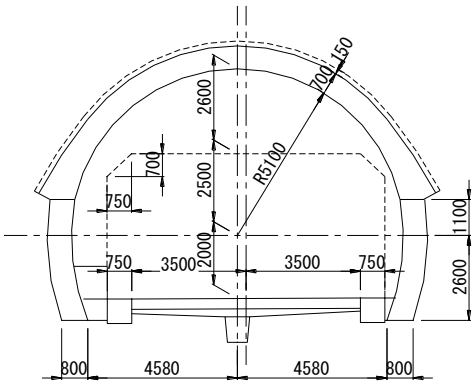


B-3　敦賀トンネル　Ⅱ期線（下り線）

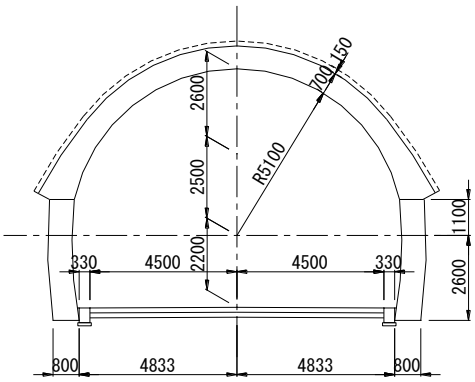
トンネル名	敦賀トンネル（下り線）Ⅱ期線		
換気方式	集塵機付縦流換気方式	所要換気量	煤煙：580m³/s CO：223m³/s
トンネル延長	2925m	計画交通量	1689 台/h
許容 CO 濃度	100ppm	許容透過率	τ＝40%　Pd＝31.1%
換気用ダクト	なし		
車速	60 km/h	換気所	地下集塵機室 1 ヵ所
その他	集塵処理風量 280m³/s 送風機：140m³/s×240KW×φ2800×2 台		







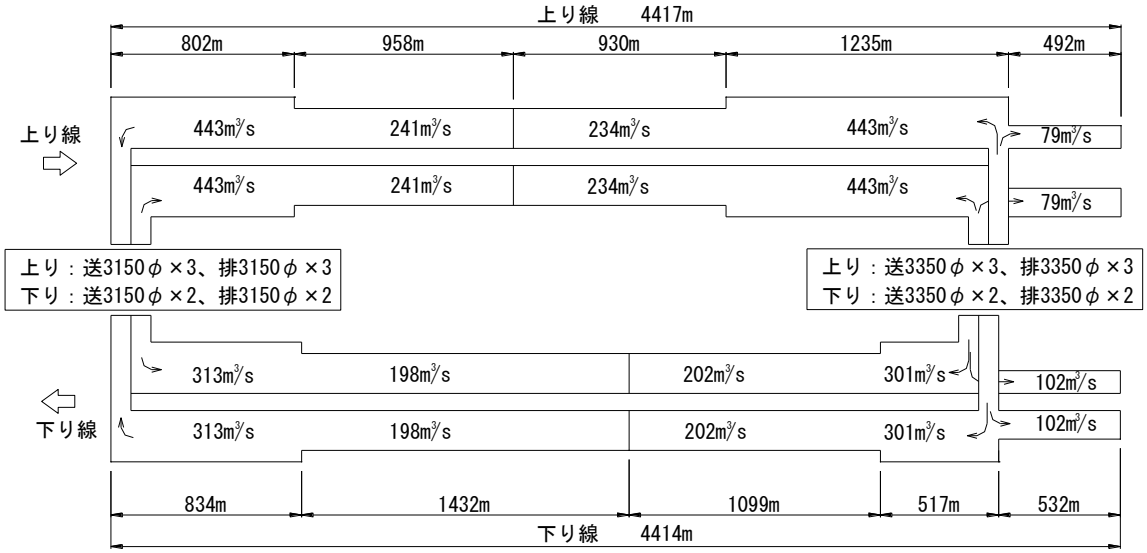
本坑標準断面図

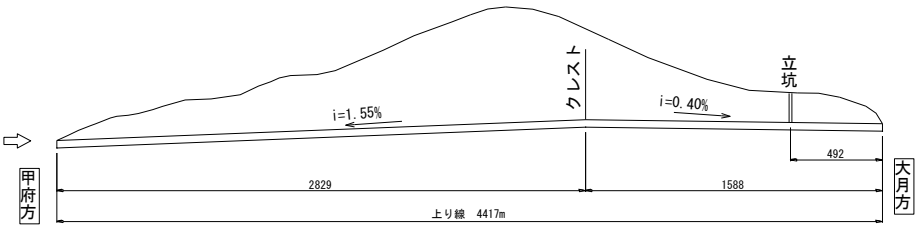


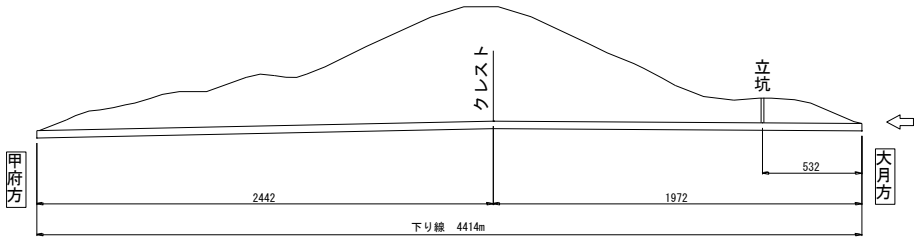
集じん機室標準断面図

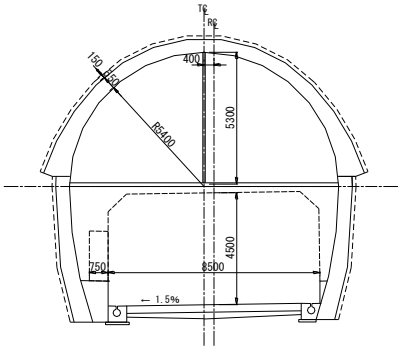
B-4　笹子トンネル

トンネル名	笹子トンネル		
換気方式	横流	所要換気量	上り線：965m³/s 下り線：716m³/s
トンネル延長	上り線 4417m 下り線 4414m	計画交通量	1640 台/h
許容 CO 濃度	150ppm	許容透過率	τ＝50%
換気用ダクト	本坑　上り線：送排気 21.98m²、12.15m²、6.73m² 下り線：送排気 15.90m²、10.03m²、6.73m² 立坑　上り線：11.4mφ50m 下り線：9mφ60m		
車速	80 km/h	換気所	西坑口及び立坑
その他	換気機（軸流） 西坑口　上り線：6 台　　立坑　上り線：6 台 下り線：4 台　　下り線：4 台		

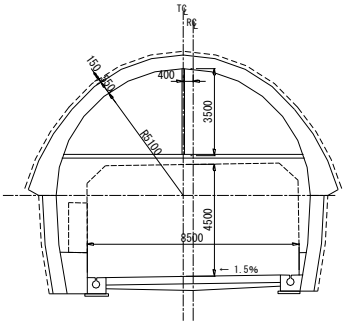




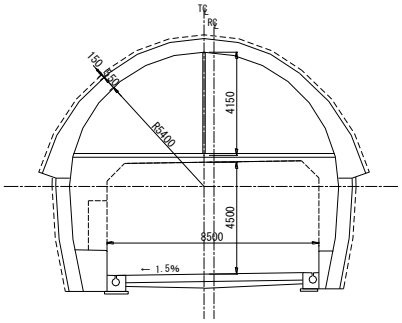




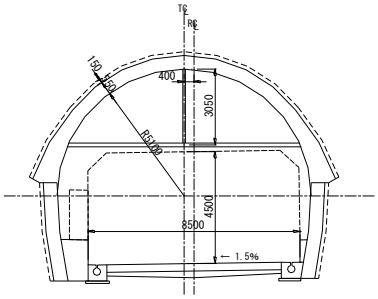
上り線　L型断面



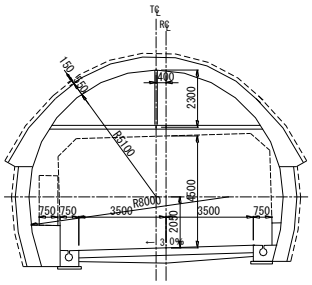
上り線　M型断面



下り線　L型断面



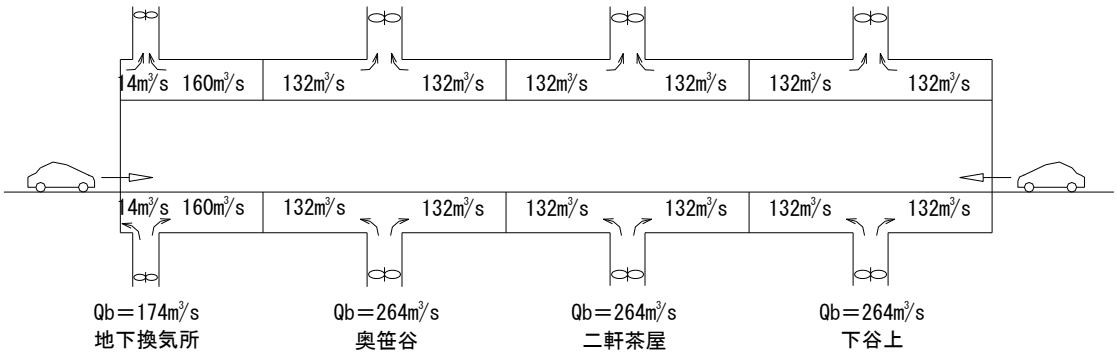
下り線　M型断面

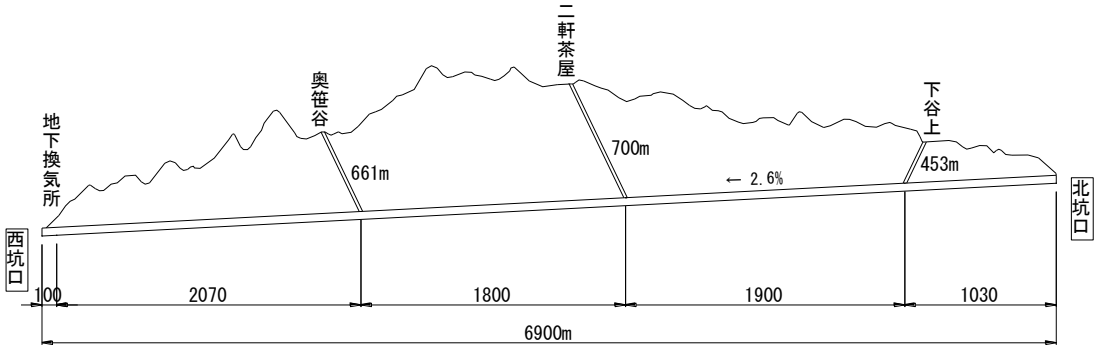


下り線　S型断面

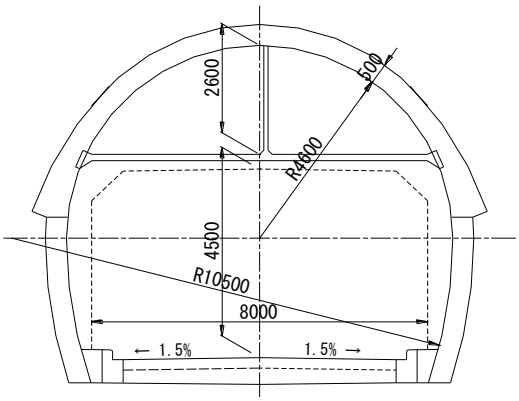
B-5　新神戸トンネル

トンネル名	新神戸トンネル		
換気方式	横流	所要換気量	966m³/s
トンネル延長	6900m	計画交通量	1640 台/h　Pd＝15%
許容 CO 濃度	150ppm	許容透過率	τ ＝40%
換気用ダクト	本坑：送気 7.33m²、排気 7.85m² 斜坑：15.77m²		
車速	60 km/h	換気所	南坑口地下、奥笹谷、二軒茶屋、下谷上
その他	換気機地下換気所 南坑口地下、奥笹谷、二軒茶屋、下谷上：送排気各 2 台		

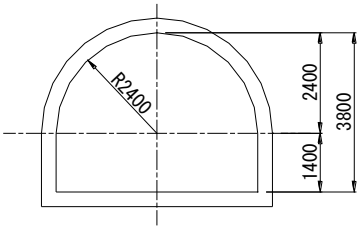



地下換気所
奥笹谷
二軒茶屋
下谷上
661m
700m
453m
← 2.6%
西坑口
北坑口
100
2070
1800
1900
1030
6900m

断面図

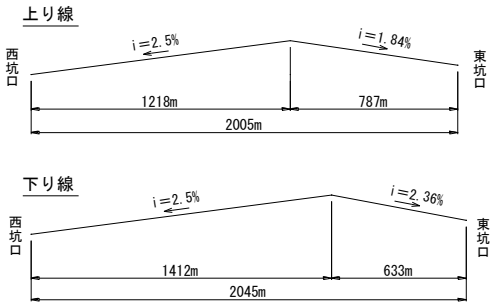

2600
500
R4600
4500
R10500
8000
← 1.5%
1.5% →

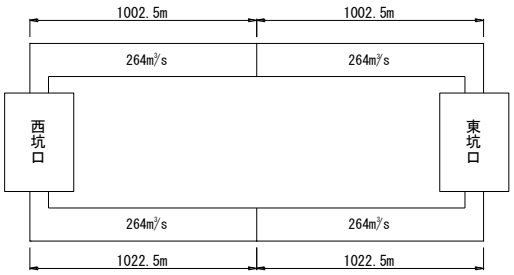
斜坑断面図

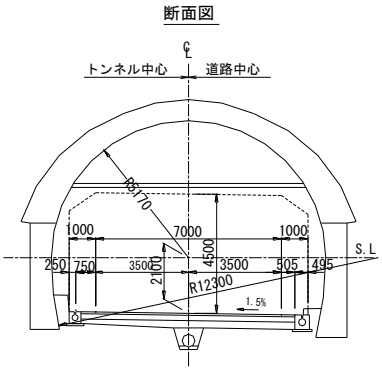

R2400
2400
3800
1400

B-6　日本坂トンネル

トンネル名	日本坂トンネル		
換気方式	送気半横流	所要換気量	上下線共通：528m³/s
トンネル延長	上り線 2005m 下り線 2045m	計画交通量	3100 台/h Pd＝36%
許容 CO 濃度	150ppm	許容透過率	τ＝30%(可能交通容量)
換気用ダクト	天井ダクト 16.6m²		
車速	60 km/h	換気所	両坑口
その他	換気機（軸流） 西坑口　上り線：3 台　　東坑口　上り線：3 台 　　下り線：3 台　　下り線：3 台		

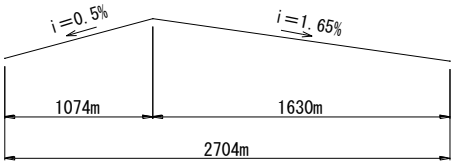


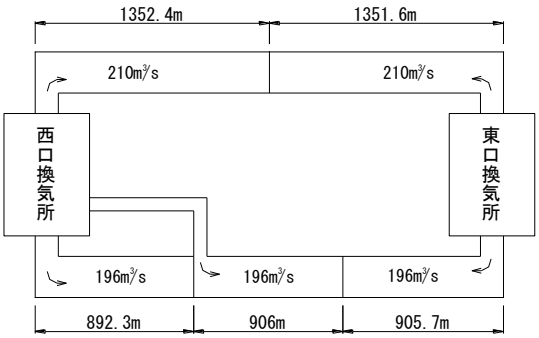




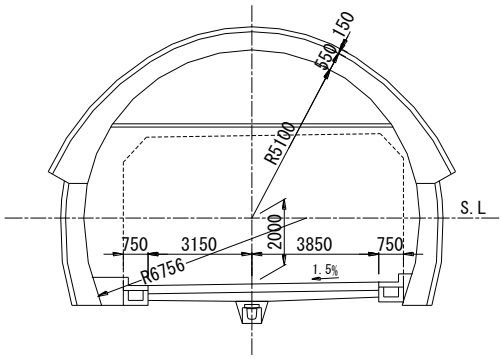
B-7　今庄トンネル

トンネル名	今庄トンネル		
換気方式	送気半横流換気方式	所要換気量	上り線：588m³/s 下り線：420m³/s
トンネル延長	上下線 2704m	計画交通量	設計交通量 1689 台/h 設計大型車混入率 43.4%
許容 CO 濃度	100ppm	許容透過率	τ ＝50%
換気用ダクト	上り線：本坑 13.35m²　水平坑 14.0m² 下り線：本坑 14.21m²		
車速	60 km/h	換気所	両坑口
その他	換気機(軸流)： 西換気所：上り線 4 台、下り線 2 台 東換気所：上り線 2 台、下り線 2 台		

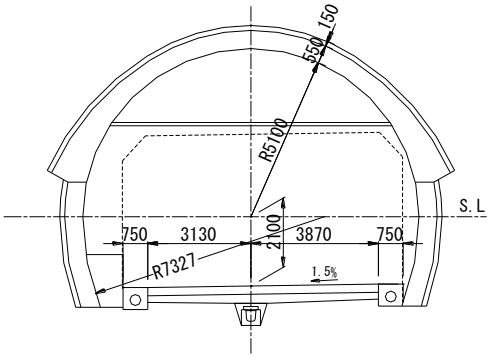




標準断面図
（上り線）



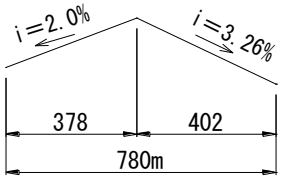
標準断面図
（下り線）



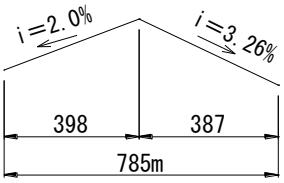
B-8　清見寺トンネル

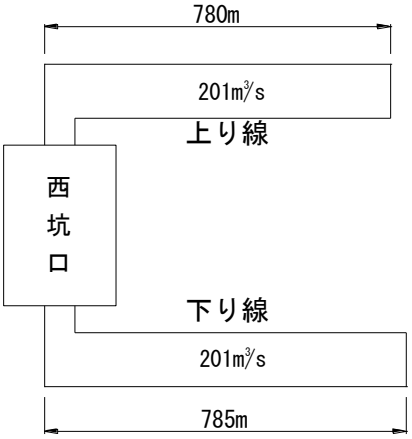
トンネル名	清見寺トンネル		
換気方式	送気半横流換気方式	所要換気量	上り線：588m³/s 下り線：420m³/s
トンネル延長	上り線 780m 下り線 785m	計画交通量	3100 台/h Pd＝36%
許容 CO 濃度	200ppm	許容透過率	τ ＝30%
換気用ダクト	13.4m²		
車速	60 km/h	換気所	両坑口
その他	換気機(軸流) 送気 3 台×2＝6 台		

（上り線）

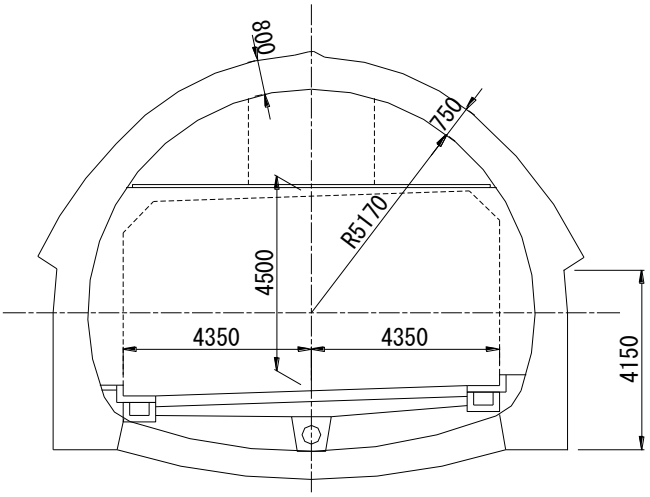


（下り線）





標準断面図



謝辞

数多くの方々からの御支援やご指導を賜りここにその成果として論文が完成致しました。

日本の道路トンネルに換気や非常用施設が設置されてから 56 年が経過しましたが最盛期の 45 年間に、関越、恵那山、笹子、新神戸、肥後、加久藤、アクアライン、飛騨、新東名や山手、品川線等日本有数の都市間高速道路及び都市内高速道路トンネルの換気・非常用施設の計画や設計を行なう機会を得ました。ネットワークの整備と共に増大したトンネルに対する経済性の追求や技術的な対応に伴う実験や研究成果、予想を超えた火災や事故対応方法、環境対策に伴う発生源の削減等により、換気や非常用施設の計画や運用方法が大きく変わってきています。本論文は、金沢大学自然科学研究科（システム創成科学専攻）に入学する機会を得て先輩たちが引退した中、一線を退く時期を向かえた技術者の一人として、換気方式を中心としてこれまでの変遷の経緯やその背景と今後の方向、従来の教科書の範囲を超える計画環境を踏まえ、その課題の抽出と対応方法について研究を行なう事が出来ました。

日本の道路トンネルに初めて火災シミュレーションを取り入れ、アクアラインの４％勾配部の熱気流の遡上防止の縦流風の検討を行った時知遇を得て、その後トンネルの火災時の状況を把握するためにご指導を戴く中で技術的にも人的にもお世話になり、このような機会を頂くと共にご指導やご助言を賜りました川端教授に厚く御礼申し上げます。そして、三カ国会議で基調講演の機会を与えて戴きました台湾中央警察消防学系教授の簡賢文様、サポートして頂きました多賀正義様に心より感謝致します。

また、さまざまなご助言やご指摘を戴きました火災研究会栗岡均様、横田昌弘様他研究会の方々、清家様には心より感謝致します。

業務の傍ら、研究に時間を割くことにご協力を戴いた㈱エコープラン社長坂口琢磨様、菊本智樹様、柳寛孝様、笹山さおり様はじめ社員の方々に大変お世話になり感謝致します。

また、本が学位論文の審査に当たって戴きました環日本海域環境研究センター教授の木村繁男様、理工研究域機械工学系教授の木綿隆弘様、理工研究域機械工学系教授の児玉昭雄様、理工研究域機械工学系准教授の多田幸生様に心から感謝致します。

最後に、裏方として支えてくれた妻の昌子に心より感謝致します。

2015 年 3 月

山田眞久