

## 高速2号東山線 東山トンネル換気設備

杉 山 渉\* 加 藤 伸 之\* 永 吉 忍\*\*

### Ventilation System for the Higashiyama Tunnel

by Wataru SUGIYAMA, Nobuyuki KATO, & Shinobu NAGAYOSHI

Ebara's transverse ventilation system, featuring concentrated exhaust, has been installed in the Higashiyama Tunnel in Nagoya City. This system is an outcome of intensive research on a ventilation system capable of removing both vehicle exhaust gas and smoke which may result in vehicle fire in the tunnel, including supplying fresh air into the tunnel. Air pollution factors had also been sufficiently worked out. Ebara ventilation system includes that installed at the Midoribashi Ventilation Station (for one direction) and the ventilation control equipment for the entire length (for both directions) of the tunnel. The following outlines the system which has been operating smoothly since March 29, 2003.

**Keywords:** Higashiyama Tunnel, Midoribashi Ventilating Station, Tunnel ventilation, Transverse ventilation system with concentrated exhaust, Variable pitch exhauster, Control system of air flow velocity, Quantity control plate, Electrostatic precipitator, Fire test

### 1. ま え が き

高速2号東山線東山トンネルは名古屋大学、東山動物公園周辺の丘陵地帯を貫通する自動車専用道路トンネルであり、2003年3月29日に供用開始となった。

本路線の開通によって市内中心部から東名阪自動車道、東名高速道路へ至るルートが確立され、市内東部地域の渋滞緩和に供することと期待されている。

東山トンネルは全長約3 kmの上下4車線の自動車専用トンネルであり、トンネル防災施設の設置グレードを示す防災等級は最上級のAAである。

トンネル換気設備は車両から排出される排気ガスによるトンネル内空気の汚染を防ぐと同時に、非常時（火災発生時）にはドライバーの避難環境の確保、及び排煙機能をもつ必要がある。そこで本トンネルでは計画段階で様々な換気実験研究、検討が重ねられた結果、集中排気付横流換気方式が採用された。

当社は本トンネルの緑橋換気所（下り）換気設備（写真1）及び上下線全体の換気制御設備の設計・施工を担当



04-80 01/203

写真1 緑橋換気所外観

Photo 1 Midoribashi Ventilating Station

当し順調に稼動中であるので、その概要を報告する。

### 2. 換 気 設 備

#### 2-1 換気設計

東山トンネルは、開通後交通量が少ない初期の期間を考慮し、設置する換気設備を段階的に施工する方法がとられた。表1に供用時のトンネル換気設計条件を示す。

#### 2-2 換気方式

本トンネルでは「集中排気付横流換気方式」が採用されている。本方式は、従来長大トンネル、都市トンネル

\* 風水力事業本部 システム技術統括 プロジェクト室  
複合プロジェクト設計部

\*\* 同 建設統括 システム事業工事統括室  
中部工事事務

表1 トンネル換気設計条件  
Table 1 Design data of tunnel ventilation

トンネル延長 Tunnel length	上り線；3083.753 m Inbound 2-laned tunnel 下り線；3438.097 m Outbound 2-laned tunnel
換気方式 Ventilation system	集中排気付横流換気方式 Transverse ventilation system with concentrated exhaust
交通形態 Traffic type	上下4車線一方通行 Inbound and outbound one-way traffic (4 lanes in all)
設計交通量（通常時） Traffic density (ordinary traffic)	上り線；3698台/h Inbound 2-laned tunnel 下り線；2654台/h Outbound 2-laned tunnel
設計交通量（渋滞時） Traffic density (traffic jam)	上り線；3610台/h Inbound 2-laned tunnel 下り線；3610台/h Outbound 2-laned tunnel
設計速度（通常時） Vehicle velocity (ordinary traffic)	上下線；50 km/h Inbound & outbound tunnels
設計速度（渋滞時） Vehicle velocity (traffic jam)	上下線；18 km/h Inbound & outbound tunnels
大型車混入率（通常時） Percentage of motor trucks (ordinary traffic)	上り線；5.9% Inbound 2-laned tunnel 下り線；10.1% Outbound 2-laned tunnel
大型車混入率（渋滞時） Percentage of motor trucks (traffic jam)	上り線；15% Inbound 2-laned tunnel 下り線；15% Outbound 2-laned tunnel
許容ばい煙透過率 Allowable limit of visibility coefficient	上り線；40% Inbound 2-laned tunnel 下り線；40% Outbound 2-laned tunnel
許容一酸化炭素濃度 Allowable limit of carbon monoxide concentration	上り線；50 ppm Inbound 2-laned tunnel 下り線；50 ppm Outbound 2-laned tunnel

表2 設備構成  
Table 2 Specifications

項目 Item	仕様規格 Specification	数量 Set
送風機（φ2500 mm） Blow fan（φ2500 mm）	極数変換式，14/18 P，60 kW Pole change type	1台 Set
送風機（φ2800 mm） Blow fan（φ2800 mm）	極数変換式，12/16 P，180 kW Pole change type	2台 Set
排風機（φ2500 mm） Exhaust fan（φ2500 mm）	極数変換式，8/12 P，360 kW Pole change type	2台 Set
排風機（φ3150 mm） Exhaust fan（φ3150 mm）	動翼可変式，10 P，530 kW Variable pitch type	3台 Set
消音装置 Silencer	セル形，ステンレス鋼板製 Cell type，Made of stainless steel plate	4式 Set
コーナペーン Corner vane	鋼板製 Made of steel plate	22式 Set
按分ダンパ Damper of change duct	鋼板製多翼式 Made of steel plate with multiple wings	4台 Set
送気フリュー Blow flue	鋼板製 Made of steel plate	285箇所 Point
排気スロット Exhaust slot	鋼板製 Made of steel plate	82箇所 Point
集中排気口ルーバ Louver of concentrated exhaust	ステンレス鋼板製 Made of stainless steel plate	1式 Set
排気口絞り板 Control plate of exhaust port	ステンレス鋼板製 Made of stainless steel plate	5式 Set
換気制御設備 Ventilation control equipment	換気卓 Ventilation control desk	1面 Set
	換気自動制御装置 Automatic ventilation control equipment	1面 Set
	換気伝送装置 Ventilation transmitter equipment	1面 Set
	換気連動盤 Relay unit panel	1面 Set
	送排風機盤 Switch gear	8面 Set
	補機盤 Auxiliary machine control panel	7面 Set
送排風機側操作盤 Local control panel	4面 Set	
除塵設備 Dust collector equipment	自動再生乾式 Auto regeneration (dry type)	1式 Set
電気集じん機設備 Electrostatic precipitation equipment	自動洗浄湿式 Auto clean (wet type)	1式 Set
ダクト冷却設備 Duct cooler equipment		1式 Set
交通量計測設備 Instrumentation of taraffic density equipment	超音波式 Ultrasonic type	1式 Set

に採用されてきた横流換気方式（トンネル横断面方向に送・排気を行う方式）をベースにしている。横流換気により区間ごとの換気（送気，排気）を行い，更に交通流によっても移送される排気ガスを出口坑口付近に設けられた集中排気口から集中排気する方式である。図1，2に換気系統図を，写真2に換気機外観を示す。

横流換気の特長は換気区間全体に均一な換気（送気・排気）が可能であるため，区間全体の環境が一定に保たれ，換気制御が容易であること，また出口坑口付近の集中排気口からの集中排気で，汚染物質の出口坑口からの漏出防止が図れることが挙げられる。また，トンネル火災時の換気運用の際においても，火点付近の横流排気口により排煙が可能であり，煙の拡散を最小限にとどめる

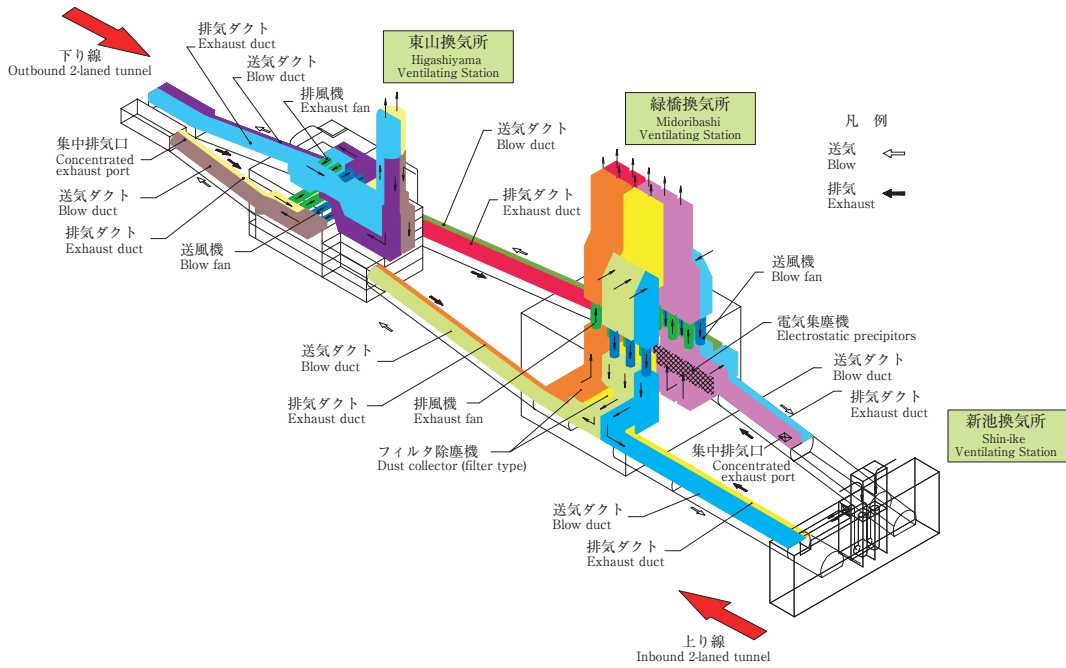


図1 東山トンネル全体換気系統  
Fig. 1 Higashiyama Tunnel Ventilating Station

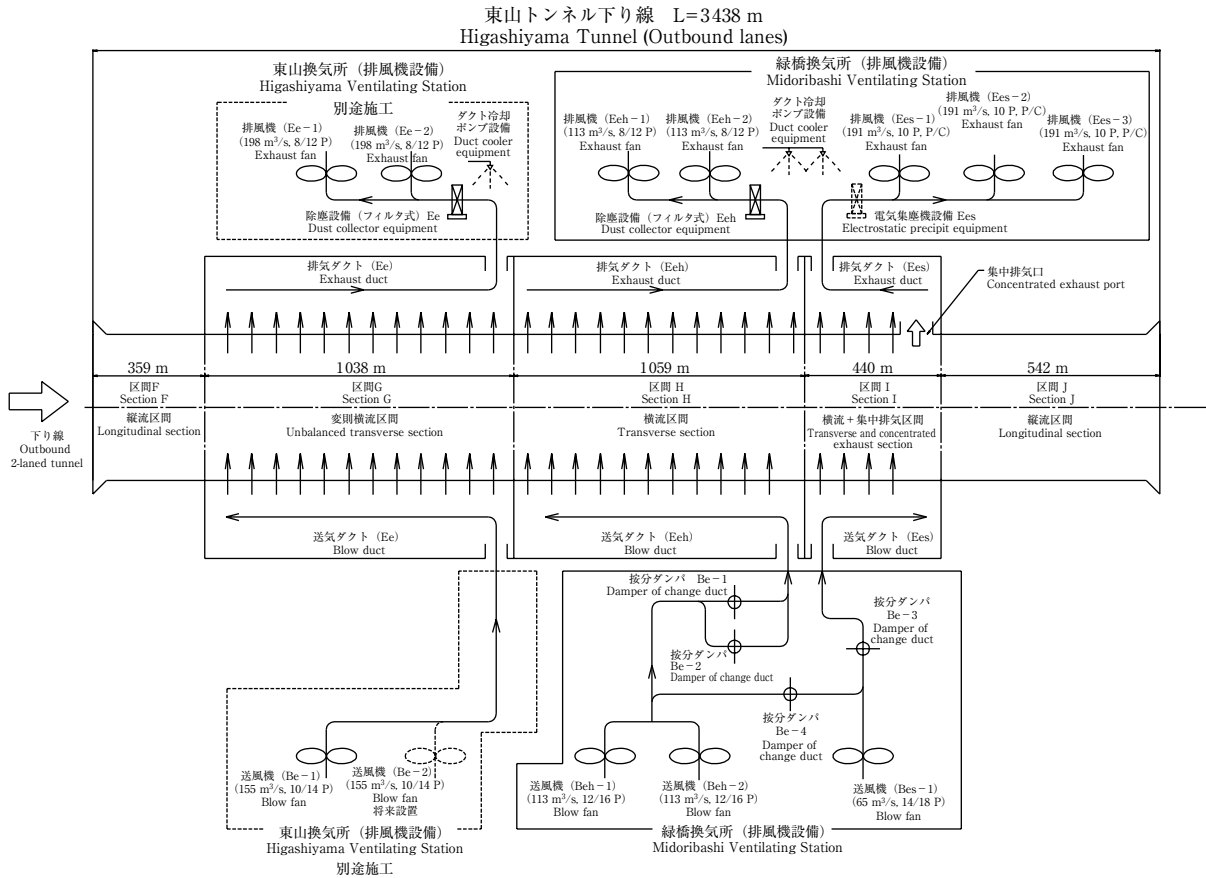


図2 下り線換気系統  
Fig. 2 Higashiyama Tunnel Ventilating Station



写真2 排風機外観

Photo 2 Main exhaust fan

04-80 02/203

ことが可能となっている。

トンネル内から排気された排気ガスは、換気所内排気風洞に設置されている電気集塵機、フィルタ除塵機によって汚染物質の除去を行う。また、排風機はトンネル火災鎮火後の排煙にも用いられるため、排煙運転時の熱的損傷から保護するために排気風洞内にダクト冷却設備を設置している。

2-3 設備構成詳細

本工事で納入した主要設備の詳細構成を表2に示す。

3. 換気制御

3-1 概要

集中排気付横流換気方式による換気制御の概要を説明する。換気制御は本工事で納入した下り線換気制御設備において、東山トンネル上下線全体の監視・制御を行っている。

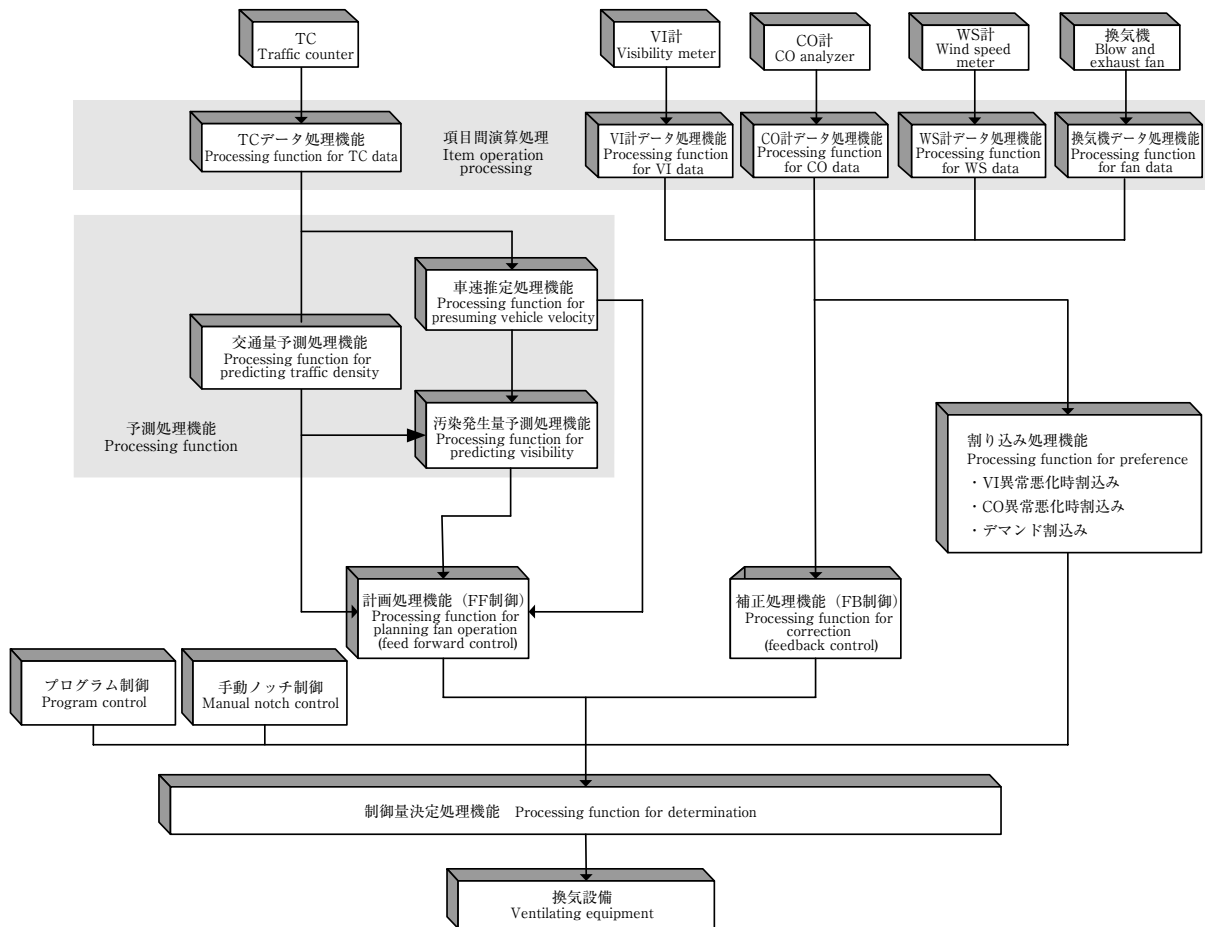


図3 通常時換気制御フロー

Fig. 3 Block diagram of ventilation (Part 1)

### 3-2 換気制御方式詳細

換気制御は以下の方式を採用している。

・通常換気時

フィードフォワード制御とファジィ理論を付加したフィードバック制御の複合制御

・火災時

トンネル内交通状態に応じた風速抑制制御

#### 3-2-1 通常時制御

通常運用状態での換気制御は、まずトンネル内の車両交通量を実測し、測定データから将来の車両交通量を車種別（大型車／小型車）に予測する。予測交通量からトンネル内視環境（VI値；Visibility）、一酸化炭素濃度（CO値；Carbon monoxide）トンネル内風速（WS値；Wind Speed）が適切となり、かつ換気機の運転電力量が最小となる換気機運転パターンを選択する（フィードフォワード機能）。

次にトンネル内のトレンドデータ（VI値、CO値、WS値）を用いて前記運転パターンに補正をかけ（ファジィフィードバック機能）、換気機運転の最終制御出力を行う。図3に通常時換気制御フローを示す。

#### 3-2-2 火災時制御

東山トンネルの換気制御において特筆されるのは火災時制御（風速抑制制御）である。本制御を採用するに当たり、東山トンネルでは「東山トンネル防災・換気検討委員会」において火災発生時に被災者の避難環境を確保すべく適切な換気運用制御等について様々な検討が行われてきた。従来、他トンネルにおいて風速抑制制御が採用された事例はあるが、換気方式として縦流換気方式を採用しているトンネルだけである。横流換気方式での風速抑制制御の採用は世界初の試みである。

風速抑制制御を確立するためには、火点の位置、火点下流側の車両通行状態の把握が重要な要素となる。これには別途施工された防災設備、交通管制設備から各種データ（火災区画信号、車速信号等）を入力し、換気機運転パターン及び風速抑制目標値決定のための判断材料として用いている。図4に概略制御フローを示す。

風速抑制制御の制御目標値は以下のとおり設定されている。

- ・火点下流側が渋滞；火点風速目標値 0.5 m/s
- ・火点下流側が非渋滞；火点風速目標値 2.0 m/s

火災発生時に火点下流側が渋滞している場合、車両走行によってトンネル外へ避難することが不可能であるため、運転者は降車して避難せざるを得ない。その際煙が路面付近まで拡散して避難者が煙で巻かれないように、

天井排気ダクトから排煙しつつ風速を0.5 m/s付近に抑制させる。また火災発生時に火点下流側が渋滞していない場合は、火点下流側の車両はそのまま走行することによって避難が可能であるので、火点上流側に煙が拡散しないように風速を2.0 m/s付近に抑制させる。

以上のように、換気自動制御装置では各換気区間毎（上下線10区間）に火点下流側の交通状態に応じて渋滞時／非渋滞時の2種類、計20種類の換気機運転パターンを設定している。

設定された換気機運転パターンが確立された後、火点風速を監視し、目標風速に追従するよう動翼可変排風機で微調整を行う。

## 4. 現地試運転調整

東山トンネル換気設備の試運転調整は2002年10月から2003年3月までの約6箇月間をかけて実施した。試験項目は多岐にわたったが、そのなかで主要試験項目を以下に紹介する。

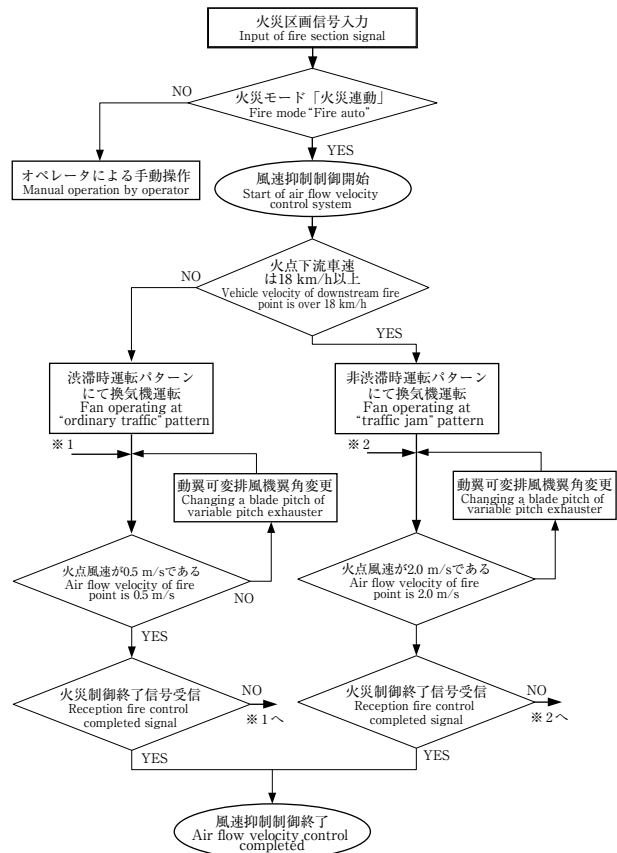


図4 風速抑制制御概略フロー  
Fig. 4 Block diagram of ventilation (Part 2)





04-80 03/203

写真3 送気ファン開度調整状況  
Photo 3 Adjustment of flow rate control plate



04-80 04/203

写真4 送気ファン外観  
Photo 4 Flue for supply air



04-80 05/203

写真5 排気スロット開度調査状況  
Photo 5 Adjustment of flow rate control plate

- (1) 送排気口風量調整板開度調整  
送気ファン、排気スロットの風量調整板の開度調整  
(写真3, 4, 5)
- (2) 火災時風速抑制制御パラメータ調整  
風速抑制制御に必要な制御パラメータ決定のため、トンネル内風速の測定及びパラメータ調整を実施
- (3) 換気運転現場検証実験  
横流排気ダクトからの排煙効果の確認、煙の挙動確認等のため、ガソリンによる火皿試験を行い、各種データを測定し、シミュレーション結果との照合を実施

#### 4-1 送排気口風量調整板開度調整

横流換気方式においては、トンネル内に等間隔に設置された換気口（送気口、排気口）から等風量換気が行われなければならない。等風量換気達成の判定方法としては、等風量換気状態のダクト内理論静圧分布に実測圧力分布が漸近するように各送排気口の風量調整板開度を調整する必要がある。

東山トンネルにおいて当社が担当した換気区間は、下り線の完全横流区間と変則横流区間（横流＋集中排気）の2区間で、送気・排気それぞれ2ダクト、計426箇所の風量調整板について開度調整を行った。開度調整は完全横流区間と変則横流区間を別々に行い、それぞれの区間において送排同時100%風量運転によって調整を行った。

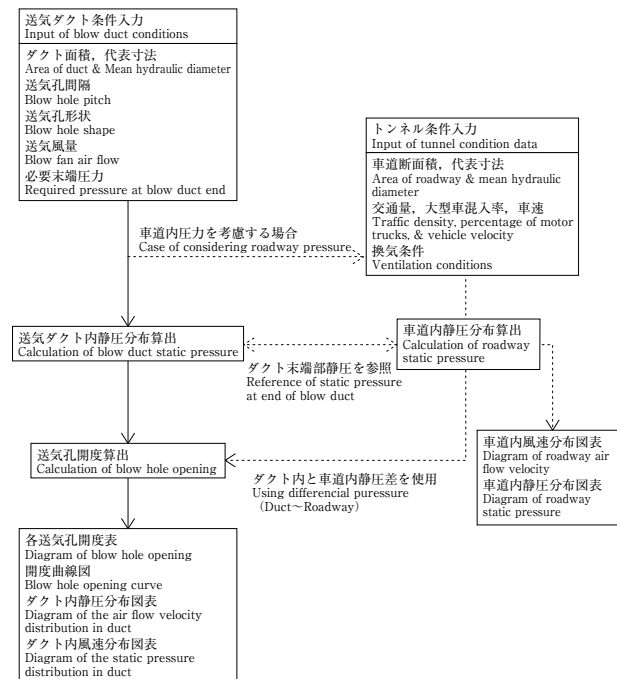


図5 理論開度計算フロー  
Fig. 5 Block diagram of theoretical calculation

初期設定する開度は計算によって求める。図5に理論開度計算の手法を記す。

初期開度は、ダクト内と車道内の圧力差により決まるが、完全横流区間の場合は車道内に縦流れがほとんどおきないため、車道内は大気圧として計算を行った。開度調整結果からも、完全横流の場合に車道内を大気圧として扱って問題ないものと考えられる（計測時において、自然換気による車道内風速は1 m/s以下であった）。

一方、変則横流区間の場合は集中排気口に向かって車道内静圧は低下するため、計算時に車道内圧力分布を計算する必要があり、実際の測定値と比較する際にはダクト内と車道内の圧力差を算出する必要がある。

図6に調整結果の1例を示す。図6は下り線I区間（緑橋換気所～集中排気口）送気ダクトの差圧分布測定結果である。開度調整の判定基準は、理論差圧分布に対して測定差圧が±10%の許容値を満たしていることを基準としている。合計4回の調整及び静圧測定を行い、第3回調整開度を最終設定として採用している。

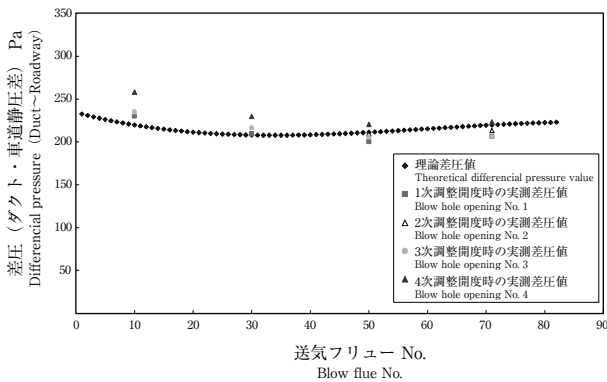


図6 ダクト～車道差圧分布  
Fig. 6 Distribution of differential pressure

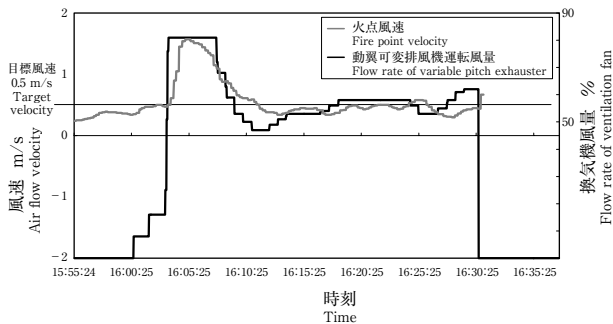


図7 風速抑制制御調整結果(例)  
Fig. 7 Distribution of air flow velocity (example)

#### 4-2 火災時風速抑制制御パラメータ調整

トンネル火災時の換気機運転パターンは上下線10区画、渋滞／非渋滞で計20パターンあり、フィードバック制御により火点風速を所定の風速目標値へ追従させるためには各パターンにおいて適切なゲイン(風量変更量)及び変更周期を設定する必要がある。図7に調整結果を示す。図7は下り線H区間中央部において火点下流側渋滞時のケースの風速測定結果である。目標風速0.5 m/sに追従するよう動翼可変排風機の制御が良好に行われていることが分かる。

#### 4-3 換気運転現場検証実験の実施

計画段階で実施されてきた換気運用シミュレーション(一次元、二次元)により評価検証が行われてきたが、横流換気方式を採用したトンネルにおいて実火災を想定した実験を実施した事例は僅少であるため、相対的な比較データは現況見当たらない。このことから、今回東山トンネルにおいて火皿火災を試験的に発生させ、火災時の換気運用モードとトンネル内における熱・煙の挙動を確認し、換気運用と避難環境について検証を行うこととなった(写真6)。

##### 4-3-1 実験検証項目

実験において検証する項目は次のとおりである。

- ・火災燃焼速度の確認
- ・火災による煙の挙動と避難環境の確認
- ・坑内風速と煙の拡散
- ・横流換気方式による排煙効果の確認
- ・水噴霧放水による冷却効果、火源抑制効果の確認

##### 4-3-2 実験実施場所

東山トンネル(下り線)  
Sta. No.751+00 (KP8.71付近)



04-80 06/203

写真6 火皿火災試験  
Photo 6 Fire test

表3 実験ケース  
Table 3 Cases of fire test

実験 No. Test No.	火災規模 (火皿面積) Fire size (Area of fire plate)	火点風速 Fire point velocity	火点区間 排気風量 Exhaust quantity of fire section	備考 Remarks
1	1 m <sup>2</sup>	2 m/s	0 m <sup>3</sup> /s	
2	1 m <sup>2</sup>	0.5 m/s	1270 m <sup>3</sup> /s	
3	1 m <sup>2</sup>	2 m/s	1270 m <sup>3</sup> /s	
4	1 m <sup>2</sup>	0.5 m/s	0 m <sup>3</sup> /s	
5	1 m <sup>2</sup>	0.5 m/s	2260 m <sup>3</sup> /s	
6	4 m <sup>2</sup>	0.5 m/s	2260 m <sup>3</sup> /s	
7	1 m <sup>2</sup>	2 m/s	2260 m <sup>3</sup> /s	
8	4 m <sup>2</sup>	2 m/s	2260 m <sup>3</sup> /s	
9	4 m <sup>2</sup>	2 m/s	2260 m <sup>3</sup> /s	水噴霧放水 Sprinkler operation

4-3-3 実験ケース及び測定項目

実験ケースを次に示す (表3)。

本実験における主要測定項目は次のとおりである。

- ・熱気流温度分布
- ・煙濃度
- ・気流速度
- ・火源燃焼状況、煙の動態

4-3-4 実験結果

図8に火点上流側への煙の遡上状況を、図9に火点周辺の煙の拡散状況を示す。最も厳しい実験条件である実験No.6 (4 m<sup>2</sup>火皿, 火点風速0.5 m/s)において、火点周辺での煙の降下は見られず、また上流側への煙の遡上速度も避難者の歩行速度以下に収まっており、避難環境が確保されていることが確認できた。

5. あとがき

東山トンネルは名古屋市内では初の本格的な換気設備

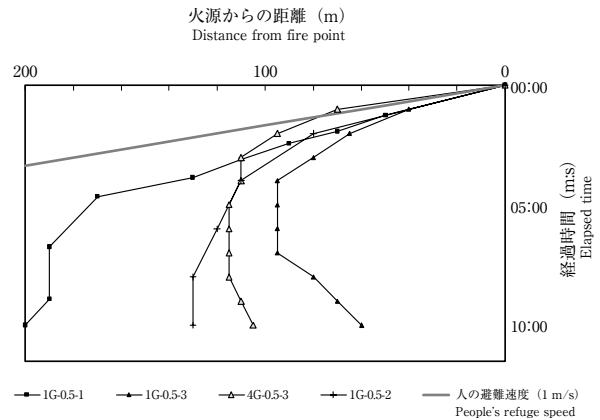


図8 煙の遡上状況  
Fig. 8 Upstream of smoke

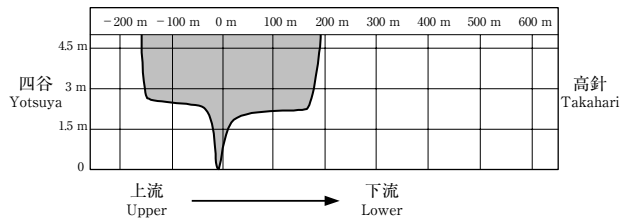


図9 煙の拡散状況  
Fig. 9 Diffusion of smoke

をもつトンネルであり、特に火災時制御に関しては世界的にも注目される制御方式が採用されている。当社は緑橋換気所(下り)換気設備、及び東山トンネル全体の換気制御設備を担当し、現地試験調整の結果、良好な結果を得ることができ供用開始後も順調に稼働中である。

結びに、長期間にわたる工事に当たり、絶えず適切なお指導を戴いた名古屋高速道路公社関係各位に謝意を表す。