

## 周辺環境対策型トンネル換気設備

宇田川 浩史\* 古谷 晃一\* 伊藤 聡士\*\*

### Tunnel Ventilation System

by Hiroshi UDAGAWA, Koichi FURUYA, & Satoshi ITO

Ebara's Tunnel Ventilation System is now being used in Asukayama Tunnel, which runs below Japan Railway's Oji Station and Asukayama Park. This system features effective control over portal leakage by combined ventilation (longitudinal, exhaust type semi-traverse & longitudinal). The following outlines this system, including its design factors.

**Keywords:** Asukayama Tunnel, Central Circular Oji Route, Control of portal leaks, Environmental-impact assessment, Combined ventilation method, Dispersed exhaust port, Model test, Tunnel ventilation

### 1. ま え が き

首都高速中央環状王子線は、中央環状線の一環として板橋区板橋地区から足立区江北地区を結ぶ路線であり、2002年12月25日に開通した。JR王子駅、飛鳥山公園の下を通過する区間が飛鳥山トンネルとなっており、飛鳥山換気所が設置されている。

一般的に、トンネル換気設備には、走行車両の排気ガスが利用者や保守作業員などに生理的な悪影響を与えないようにすることや、良好な視野環境を確保すること及び火災時の排煙を行う目的がある。しかし、飛鳥山トンネルのような都市部のトンネル換気には、トンネル坑口や換気塔からのトンネル内空気の排出に対する配慮など、周辺大気環境の保全が求められる。そのため、飛鳥山トンネルでは、周辺環境対策として、坑口漏れ出し抑制制御を行っている。

### 2. 換気設備概要

#### 2-1 換気概要

飛鳥山トンネルの換気設備に要求される役割として

は、トンネル内視環境の確保、火災時の排煙運転による避難環境の確保のほか、周辺大気環境の保全がある。周辺大気環境の保全については、環境影響評価によりその対策が検討されており、これに基づき換気設備の設計が行われた。

飛鳥山トンネルは一方通行トンネルであるため、周辺環境対策としては、トンネル出口坑口及び換気塔からの空気流出について配慮する必要がある。具体的には、トンネル出口坑口からのトンネル内空気排出量を一定量以下に抑制（以下、坑口漏れ出し抑制）することである。更に、換気塔からの流出については、排風機によりトンネル内から排気した空気を、電気集塵機（別途工事にて設置）で排気ガス中に含まれる浮遊粒子状物質を高い効率で除去した後、換気塔から吹出し拡散させることにより、周辺大気への影響を極力小さく抑えている。

写真1に飛鳥山換気所の外観を示す。

#### 2-2 トンネル換気方式

飛鳥山トンネルでは、坑口漏れ出し抑制を重視した換気を検討していることから、坑口漏れ出し抑制に対して換気効果の高い換気方式を選定することにより、効率的な換気を実現している。

飛鳥山トンネルでは、縦流式、排気半横流式（分散排気口区間）、縦流式からなる「組合わせ換気方式」を採用した。図1に換気概要図を示す。

\* 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  
東京工事部



04-04 01/202

写真1 飛鳥山換気所外観  
Photo 1 Asukayama Ventilation Station

## 2-3 機器仕様

### 2-3-1 設計条件

換気設備の主な設計条件は表1のとおりである。換気量は、車道内濃度及び坑口漏れ出し率の両者を考慮して算定している。

### 2-3-2 排風機設備

排風機仕様は表2に示すとおりである。風量は大型車ばい煙排出係数及び自動車等価抵抗面積に最新の知見を取り入れることにより、また全圧は、数値解析及び模型実験を実施することにより決定した。

排風機は、交通量変動に対応した換気を行うため動翼可変式とし、動翼制御は翼角制御ユニットで行う。排風機直下には逆流防止用の仕切ダンパを設置している。また、内回り排風機については、サージングを抑えるため、吸込側を失速抑制型構造としており、内面にサージング防止リングを有している。写真2に内回り排風機の外観、図2、3に同断面構造図、同特性曲線を示す。

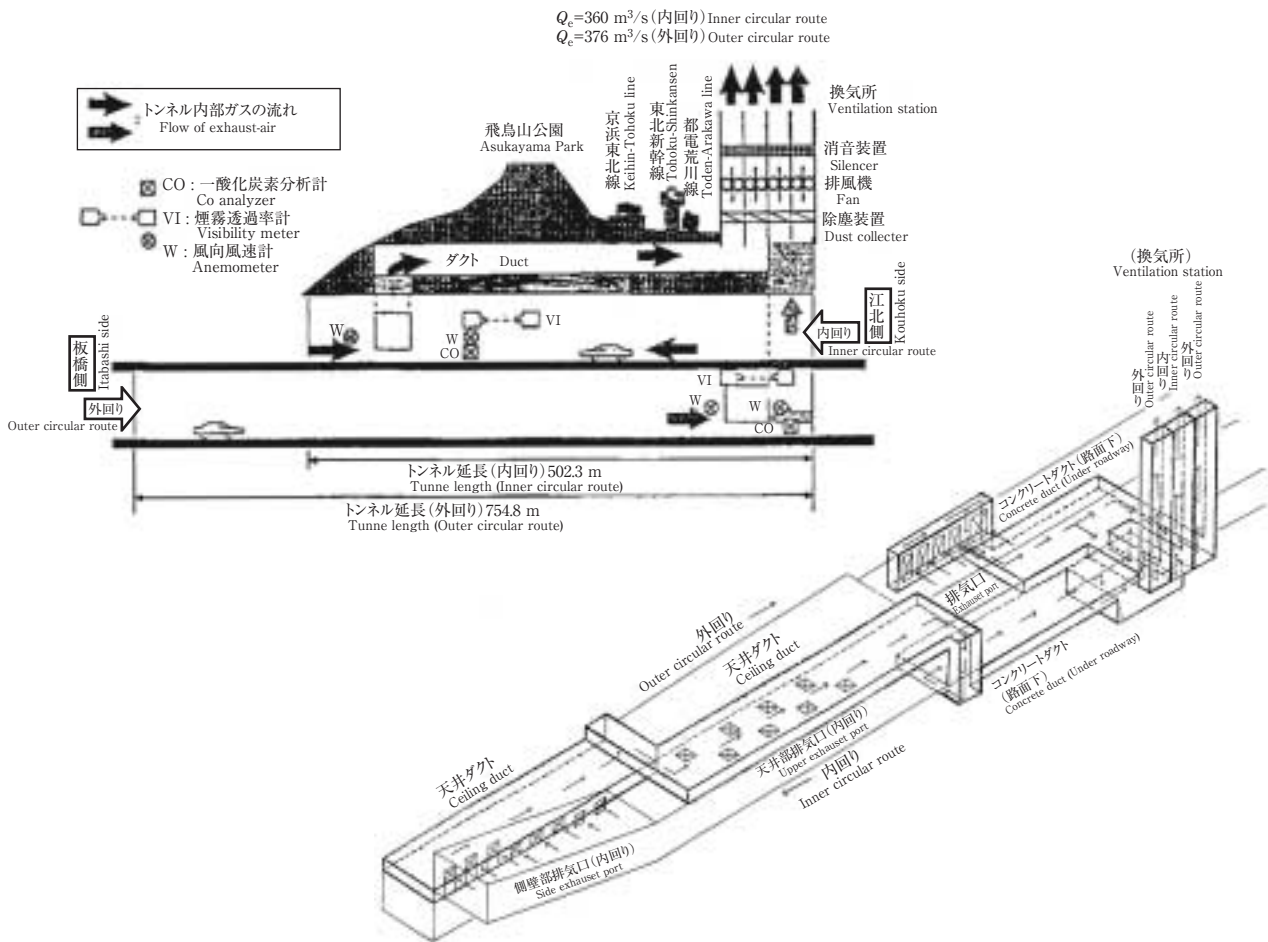


図1 換気概要図  
Fig. 1 Ventilation outline

表1 設計条件  
Table 1 Design data

	外回り Inner circular route	内回り Outer circular route
トンネル延長 Tunnel length	754.8 m	502.3 m
車道内許容煤煙濃度 Allowable limit of visibility coefficient	$\tau = 40\%$	
坑口漏れ出し率 Portal leakage ratio	15%	10%

表2 排風機仕様  
Table 2 Specifications of exhaust fan

	外回り排風機 For outer circular route	内回り排風機 For inner circular route
口径 Fan diameter	$\phi 3350$ mm	$\phi 3150$ mm
形式 Type of fan	電動機内装動翼可変式立形軸流排風機 Axial fan (vertical type) setting motor with variable pitch blade	
風量 Flow rate	188 m <sup>3</sup> /s (at 100%)	180 m <sup>3</sup> /s (at 100%)
全圧 Pressure	1715 Pa (at 100%)	3479 Pa (at 100%)
電動機出力 Driving power	460 kW	890 kW
電源 Power supply	6000 V 50 Hz	
始動方式 Starting type	コンドルファ (65%タップ)	
台数 Number of fan units	2台	2台

### 2-3-3 換気ダクト設備

換気ダクト内には、圧力損失を低減させるために、コーナベーン及び整流板を設置している。整流板の形状については、数値解析及び模型実験により形状を決定した。また、トンネル内排気口部には、各排気口からの排気量を調整する風量調整板や、紙片等の異物流入を防止するルーバを設置している。

- ・コーナベーン：計25箇所
- ・整流板：計19箇所
- ・風量調整板：計40箇所（内回りだけ）
- ・排気口ルーバ：計11箇所（外回りだけ）

### 2-3-4 計測設備

トンネル内には、トンネル内環境を監視するための煙霧透過率測定装置、一酸化炭素検出装置及び風向、風速を測定するための風向風速計を設置している。更に、これら計測情報を一括監視する計測盤を換気所内に設置している。

- ・煙霧透過率測定装置：2組（内回り×1，外回り×1）



04-04 02/202

写真2 排風機外観  
Photo 2 Exhaust fan

- ・一酸化炭素検出装置：2台（内回り×1，外回り×1）
- ・風向風速計：4台（内回り×2，外回り×2）
- ・計測盤：1面

### 2-3-5 動力・制御設備

排風機、補機に動力を供給する動力設備、換気制御演算処理や運転操作・監視を行う制御設備を設置している。

- ・引込盤：2面
- ・排風機盤：4面
- ・補機盤：4面
- ・換気操作盤：2面
- ・自動制御盤：3面
- ・補助リレー盤：2面
- ・機側操作盤：4面

### 2-3-6 搬入・搬出設備

機器の搬入・搬出及び排風機の組立・分解をするための設備を設置している。

- ・天井クレーン：3基（10 t×1，30 t×2）
- ・台車：1台

## 3. 流れ解析・模型実験

### 3-1 目的

排気ガスを含んだトンネル内の空気は、トンネル側壁及び天井に設置した排気口から連絡ダクトを経由して換

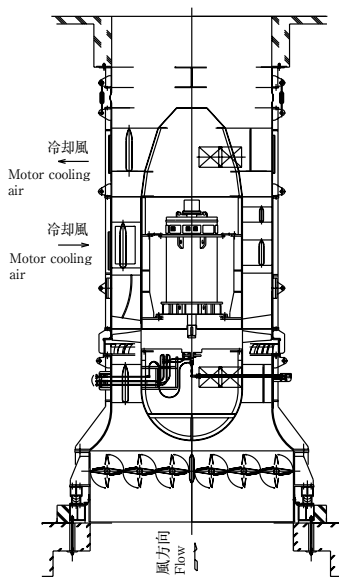


図2 断面構造図  
Fig. 2 Sectional view

気所内に設置した排風機で吸引し、換気所屋上の換気塔から排気する。換気所は江北坑口側に設置されているため、板橋坑口側に排気口が配置されている内回りトンネルについては、連絡ダクトが非常に長い。

更に、内回りトンネルの換気ダクトは、トンネル内排気口から換気所内排風機までの間に、外回りトンネルの車道上部（トンネル断面部上方を天井板で仕切ることによってダクトを確保）から、内回りトンネルの車道上部、車道下部を経由している。これは、換気ダクトがコンクリート躯体で作られた土木構造物であり、飛鳥山トンネルが数種の工法により掘削されていることで、工法が変化する地点でトンネル断面構造が異なり、ルート変更が余儀無くされていることによる。このため、ダクトの途中に、連続曲がり及び異形断面接続で構成される複雑曲がり部を有し、局所的に大幅な圧力損失の増大を生じる。

通常、ダクト内圧力損失の算出にはJSME Data Book等の損失係数を使用し、各部の損失を加算することにより算定する。しかし、複雑曲がりダクト部は、他には例を見ない特殊なダクト形状をしているため、JSME Data Book等の損失係数による圧力損失の算定は困難であった。更に、曲がり部が連続すると、前述の損失係数による算出値よりも高い圧力損失値を示す傾向があることが、過去の模型実験により確認されている。

そのため、圧力損失値が大幅に増大することにより、排風機運転点がサージング領域に突入する恐れがあった。

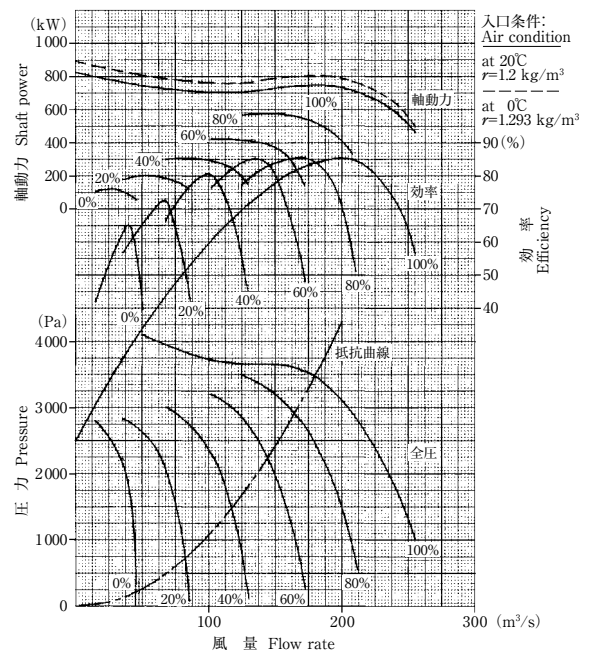


図3 特性曲線（内回り）  
Fig. 3 Performance curves of fan

そこで、圧力損失値を正確に算定するため、複雑曲がり部の圧力損失係数を、数値解析と模型実験を併用して検討した。本手法は、数値解析の長所（形状変化への対応が比較的容易）を利用し、その短所（得られた結果の定量的評価への信頼性に乏しい）を模型実験で補うことのできる効率的な手法である。

### 3-2 数値解析

手計算が困難と判断した複雑曲がり部は全3箇所あり、まず数値解析により圧力損失の概算値を確認した。解析の対象とした曲がり部を図4に示し、主な解析条件は表3のとおりとした。

いずれの曲がり部においても、手計算による算出値を大幅に超える圧力損失をもたらす恐れがあることが確認された。圧力損失の増加は排風機の電動機出力の増大につながるため、多大な圧力損失が見込まれる箇所には圧力損失の低減対策が必要であった。この低減対策は、流れ場の状態を確認することにより、乱れの発生する地点に整流板を配置することで実現した。整流板の設置位置、形状については、ダクト形状が複雑であるが、数値解析では比較的容易に形状変更が可能であったため、試行錯誤的に決定した。

圧力損失低減対策案は最終的に最も効果の得られたものを採用し、図5に示す。区間1においては、低減対策の効果を確認することができなかったが、その他の区間

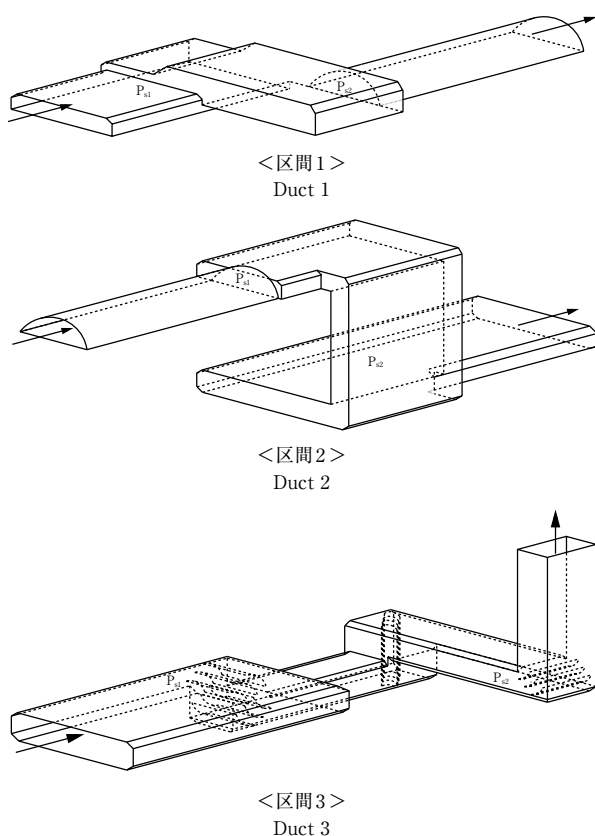


図4 数値解析対象ダクト  
Fig. 4 Ducts for numerical analysis

表3 解析条件

Table 3 Analytic conditions

乱流モデル Turbulent flow model	RNG k-ε モデル RNG k-ε model
壁境界条件 Wall condition	対数則 Logarithm rule
流入条件 Entrance condition	一定流入 (50 m/s) Constant inflow (50 m/s)
出口条件 Exit condition	大気圧 Atmospheric pressure

においては大幅な低減効果が確認された。解析結果の一例を図6、得られた損失係数を表4にまとめる。

圧力損失低減対策の効果については、供試部前後の全圧差をもとに圧力損失係数を算出することにより確認した。圧力損失係数は、供試部前後の全圧差を上流側動圧で無次元化した係数とし、式(1)のとおり定義した。なお、供試部近傍の圧力は複雑流れの影響で一定でないため、供試部上流・下流各区間に設けた十分な長さの直管ダクト内での静圧分布をもとに静圧差を求めた。

$$\zeta = \Delta P_t / \left( \frac{\rho}{2} \times U_1^2 \right) \dots\dots\dots (1)$$

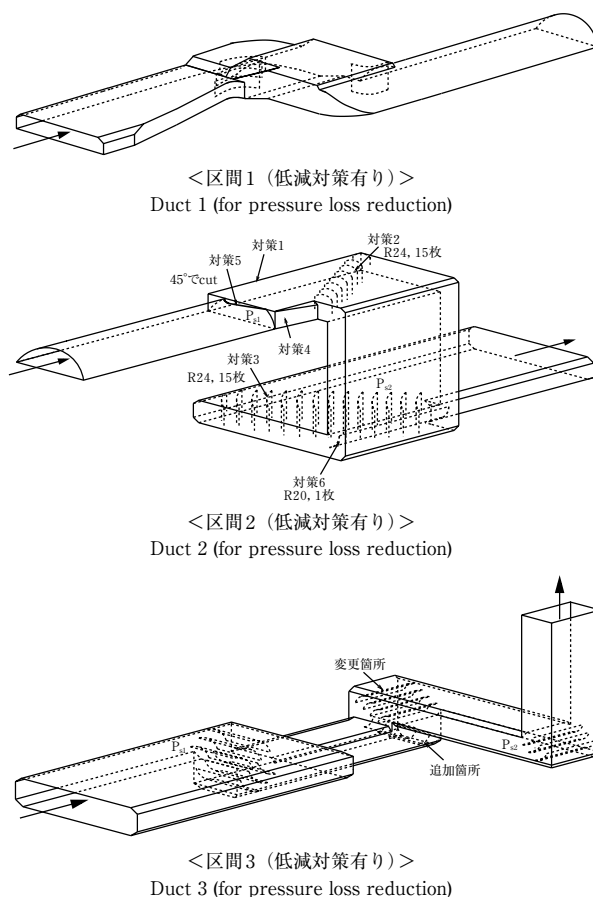


図5 数値解析対象ダクト (低減対策有り)  
Fig. 5 Ducts with means of pressure loss reduction

$$\Delta P_t : \text{全圧差} \left[ = \left( P_{s1} + \frac{\rho}{2} \times U_1^2 \right) - \left( P_{s2} + \frac{\rho}{2} \times U_2^2 \right) \right]$$

$\rho$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$P_{s1}$  : 供試部上流側検査面静圧値 [Pa]

$U_1$  : 供試部上流側ダクト内平均風速 [m/s]

$P_{s2}$  : 供試部下流側検査面静圧値 [Pa]

$U_2$  : 供試部下流側ダクト内平均風速 [m/s]

3-3 模型実験

数値解析では、各部の圧力損失係数の概算値及び圧力損失低減対策案を提案することができたが、圧力損失を算定するためには、より正確な圧力損失係数が必要となる。そこで、実現象と同等の条件での検証が行える模型実験を実施した。

(1) 実験装置

実験に使用する供試模型は、実ダクトを縮率1/50で再現し、透明塩化ビニルを用いて製作した。供試部の前後には十分な長さの直管を接続し、その形状は実ダクトと同一とした。また、入口側直管の先端は大気開放とし、出口側直管の終端に接続した排風機によりダクト内に気



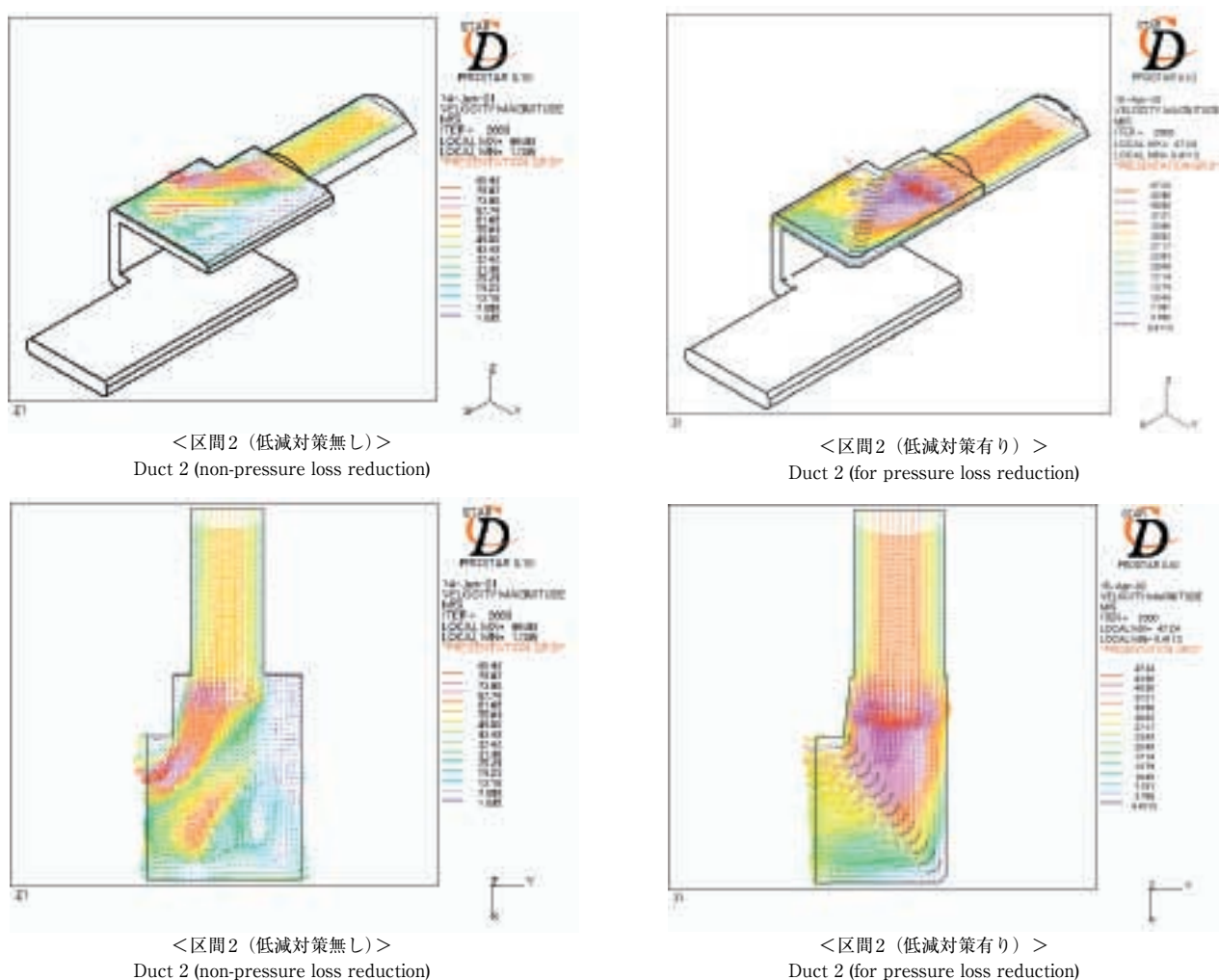


図6 数値解析結果の一例（風速分布）

Fig. 6 An example of numerical analysis (Velocity distributions)

流を発生させた。実験に使用した模型を写真3に示す。

(2) 実験方法

実験ではダクト内静圧を測定することにより、曲がり部での静圧差を求めた。ただし、供試曲がり部は複雑な形状をしており、乱れの発生により静圧の測定が困難である。そこで、測定精度を上げるため、供試曲がり部前後における静圧を測定した。ダクト内各断面位置での静圧は、ダクト同一断面内の3～4箇所以内径1 mmの静圧孔を設け、これらの圧力を1本の導管にまとめることにより、断面内の平均静圧として求めた。なお、静圧測定点は約250 mmピッチとした。本測定には、スキャニングバルブ、差圧センサ、同変換器、コンピュータからなる自動計測システムを利用した。図7に測定系統図を示す。

(3) 実験結果

実現象と同等の条件で実験を行うため、本実験に先立

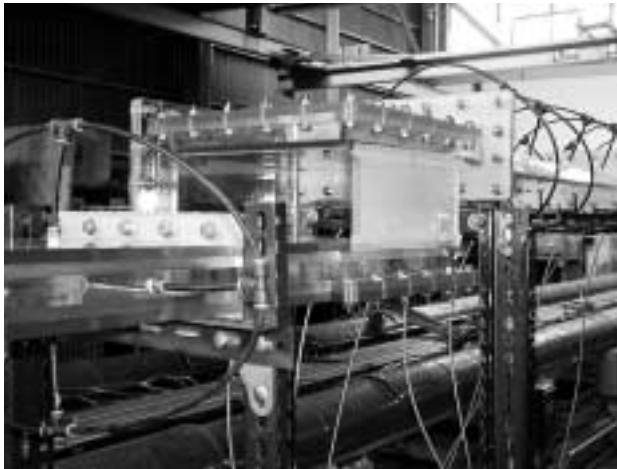
表4 圧力損失計数（数値解析）  
Table 4 Coefficients of pressure loss  
(Obtained by numerical analysis)

対象区間 Test section	ダクト内形状 Duct type	圧力損失係数 Pressure loss coefficient
1	低減対策無し Non-pressure loss reduction duct	1.8
	低減対策有り Pressure loss reduction duct	1.9
2	低減対策無し Non-pressure loss reduction duct	6.1
	低減対策有り Pressure loss reduction duct	2.1
3	低減対策無し Non-pressure loss reduction duct	7.5
	低減対策有り Pressure loss reduction duct	4.3

ち、流れ場の相似を確認する予備実験を行った。流れ場の相似はレイノルズ数を一致させることにより実現することができるが、供試模型を1/50で再現しているため、



<区間1>  
Duct 1



<区間2>  
Duct 2



<全体>  
Complete view

04-04 03/202

写真3 供試模型  
Photo 3 Model (1/50 scale)

ダクト内風速を実風速の50倍にする必要が発生する。そこで、レイノルズ数と損失係数の関係を求めることにより、実際のレイノルズ数領域における損失係数を外挿した（十分発達した乱流域である高レイノルズ数領域では損失係数が一定値を示す傾向があり、この領域に実験レイノルズ数を設定すれば、実際と同様の流れ場を再現できるものと考えた）。この実験から、レイノルズ数が約 $8.5 \times 10^4$ の領域において圧力損失係数はほぼ一定値を

表5 圧力損失計数（模型実験）  
Table 5 Coefficients of pressure loss  
(Obtained by model test)

対象区間 Test section	ダクト内形状 Duct type	圧力損失係数 Pressure loss coefficient
1	低減対策無し Non-pressure loss reduction duct	3.6
	低減対策有り Pressure loss reduction duct	2.8
2	低減対策無し Non-pressure loss reduction duct	4.8
	低減対策有り Pressure loss reduction duct	1.9

示すことが分かり、実ダクトにおけるレイノルズ数約 $3.5 \times 10^5$ に対し、実験レイノルズ数は $8.9 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ の範囲とした。

模型実験により得られた各部の圧力損失係数を表5に示す。圧力損失係数は、対象曲がり部の静圧差とダクト内平均風速を測定することにより求め、数値解析と同様に式(1)により算出した。いずれの区間においても、低減対策の効果が確認されたため、低減対策案を実際に採用した。

また、本結果をもとに圧力損失の算定を実施したが、模型実験を実施していない区間3においては、区間1、2の結果を参考に、数値解析で得られた圧力損失係数を補正して算定に使用した。

#### 4. 換気制御

##### 4-1 坑口漏れ出し抑制制御

模型実験等で確認されているが、トンネル内走行車両による拡散の影響により、機械換気を行っても出口坑口からの汚染空気流出を完全に制限(流出量をゼロとする)することはできない。そこで、坑口周辺環境を保全する目的で坑口漏れ出し抑制を行っている。

坑口漏れ出し抑制とは、トンネル内で発生した汚染物質が出口坑口から流出することを抑制するものであり、坑口漏れ出し抑制を行うために、坑口からの汚染物質排出量を制限する際の指標である「坑口漏れ出し率」を導入した。この坑口漏れ出し率とは、トンネル内で発生した汚染物質のうち、何割が坑口から流出するかを表したものであり、飛鳥山トンネルでは、環境影響評価に基づき内回りトンネルで10%、外回りトンネルで15%に設定された。

図8に坑口漏れ出し量演算フローを示す。各演算処理は、交通量測定装置(別途工事にて設置)からの交通量データ(小型・大型車台数、走行速度)、及び排風機運

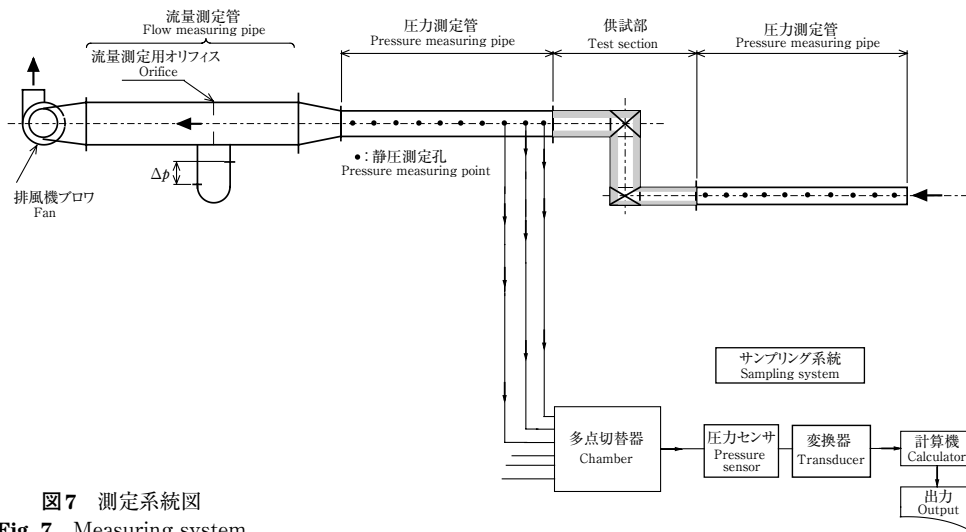


図7 測定系統図  
Fig. 7 Measuring system

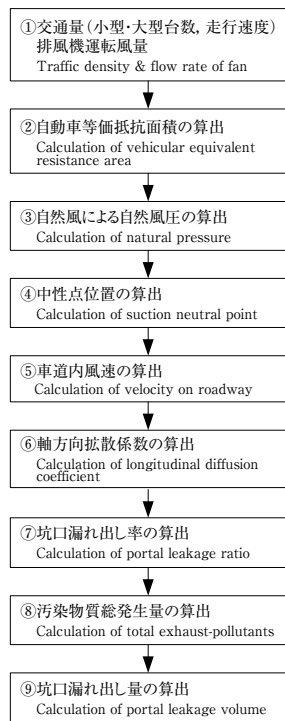


図8 坑口漏れ出し量演算フロー  
Fig. 8 Calculation flow of predictive leakage volume

転風量をもとに行っている。②，⑤，⑥，⑦の算出には最新の理論式を採用している<sup>1, 2)</sup>。

一方、坑口漏れ出し率を把握するためには、坑口漏れ出し量を定量的に把握することが必要である。これは、坑口付近でのバックグラウンド濃度の影響を考慮し、出口側縦流区間に設置している風向風速計により、逆流空気量を把握することで監視しており、以降の制御にフィードバックすることにより坑口漏れ出しを抑制している。

#### 4-2 制御システム

換気制御方式には、予見ファジィ推論を用いたフィードフォワード制御方式を採用している。本制御方式について、飛鳥山トンネルにおいては、あらかじめ制御可能な運転案を設定しておき、そのすべての運転案に対して、種々の予測シミュレーションを行い、その結果をファジィ評価し、更に各評価項目に対する評価値（換気制御に対する各項目の重要度を示すことで、異なる項目の予測結果を総合的に判断させる）の荷重和を求めることで総合満足度となる指標を求め、総合満足度の最も大きい運転案を制御出力するシステムの構築を行った。予測する項目は、VI汚染濃度、坑口漏れ出し量、運転台数切替、使用電力量の4項目とし、運転パターンの変更に伴う各状況の変化をシミュレーションにより定量的に求め、メンバーシップ関数（特性関数）を定義すること、及び各評価項目に与える荷重値を設定することにより、各運転パターンによる換気効果を比較検討している。図9に換気制御演算ブロック図を示す。

#### 5. 現地調整

トンネル換気は、自然風や交通特性等の影響を大きく受けるが、これらは個々のトンネルで全く異なる。また、最適な換気制御を実現するために、開通後に現地で換気制御盤の調整をした。現地での調整項目は種々あるが、換気制御に及ぼす影響が大きいパラメータはトンネル内風速値である。しかし、風速計は建築限界の制約からトンネル側壁近傍に設置しており、トンネル内平均風速よりも低い風速値となる。そのため、開通前の現地試運転時に、トンネル内断面風速値と風向風速計計測値の相関



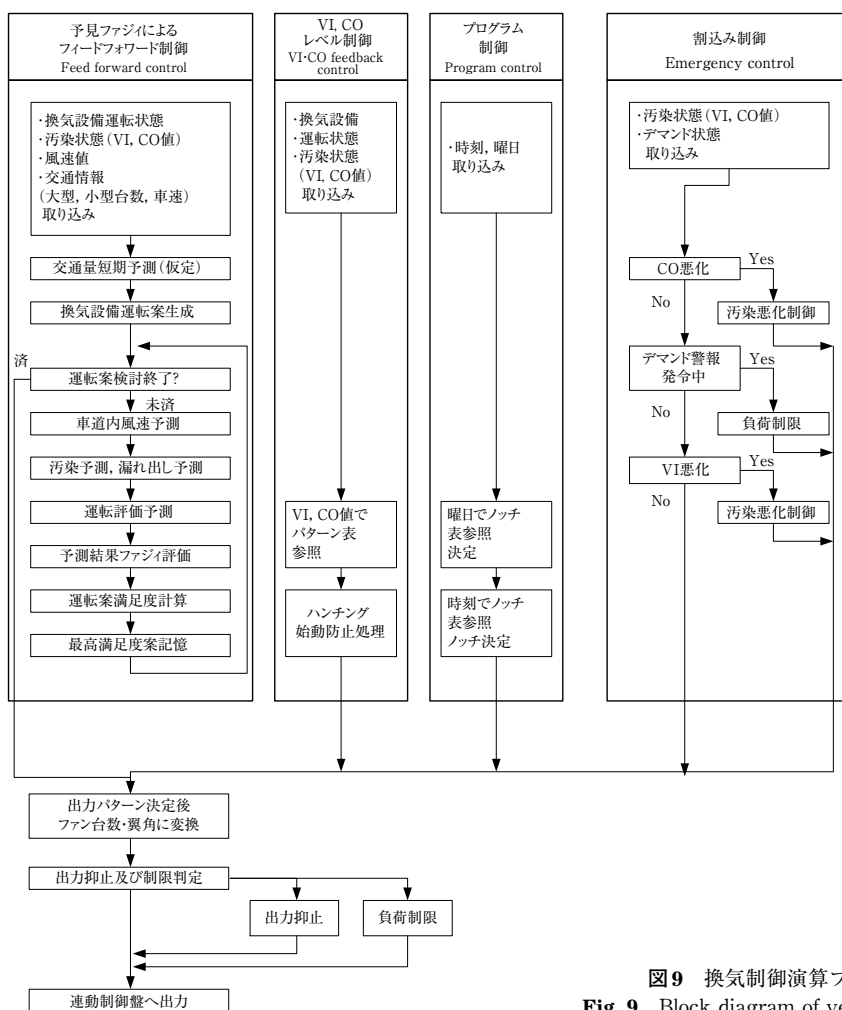


図9 換気制御演算ブロック図  
Fig. 9 Block diagram of ventilation system

関係を求めることにより、風向風速計計測値を補正した。

一方、飛鳥山トンネルのようにトンネル内空断面が小さいトンネルにおいては、走行車両が風向風速計近傍を通過する時の過渡的な風速変化を検知してしまう。特に、逆風域となる出口側縦流区間においては、風向を含め風速値が大幅に変動する。飛鳥山トンネルでは、逆風域の風速値は-1 m/s前後となることが多く、最大でも-2 m/s程度であるのに対し、通過車両の走行速度は80 km/h前後で推移している。このため、逆風域の風速値を正確に測定することは非常に困難であった。

この対策としては、トンネル内を流れる風量の収支バランスを利用した。車両の走行方向と換気風向が同じである入口側縦流区間で計測される風速値は、ほぼ正確な計測値を取得できるため、入口側区間の風量と排気機により排気口から排気される風量より、出口側区間が逆風域となるかどうかを予測し、出口側区間の風速計計測値の補正を行った。

## 6. あとがき

飛鳥山トンネルは、複雑曲がり部を有する換気ダクトと、坑口漏れ出し抑制制御を取り入れた換気制御に特徴のあるトンネルである。都市部におけるトンネル換気においては、周辺大気環境の保全を重要視した坑口漏れ出し抑制制御が今後も採用されると思われる。

最後に、本換気設備工事の施工に際し、本工事にご協力頂いた方々に深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 山田, 小松, 下川, 道路トンネルにおける拡散を考慮した換気特性- 組合せ換気方式の濃度分布及び坑口漏れ出し率の理論検討 -, 高速道路と自動車, 第43巻, 第3号, p. 26-31 (2000)
- 2) 大橋, 山田, 小松, 道路トンネルにおける走行自動車による軸方向拡散 (軸方向拡散係数の相関式と応用例), ターボ機械, 第31巻, 第6号, p. 33-42