

# 分岐合流を有するトンネルの換気設計に関する実験報告

建設事業部                      工事調整グループ                      味原 和広  
情報システム管理室          情報システムグループ                堀越 廣一

## 要 旨

近年の都市道路トンネルは、淀川左岸線（1期，2期）及び大和川線などで見られるように、延長が3 kmを超え、かつトンネル内に分岐合流部を有する道路構造となっている。このような都市道路トンネルの換気設計を行うにあたって、特に坑口及び出路からの排気ガス持ち出しを抑制するといった環境対策を考慮した換気設計は計算上複雑な圧力損失を組み合わせで行うことが一般的である。

本報告では、分岐部を有する模型自動車走行装置により、換気計算に用いる分岐合流部の圧力損失係数を導きだし、トンネル換気設計に反映させることにより換気設計の精度向上及び正確な換気制御へと繋げることで、環境対策に寄与すると共に、トンネル換気設計に必要となる定量的な基礎資料を提供するものである。

**キーワード**：換気設計，環境対策，分岐合流部，圧力損失，圧力損失係数，模型自動車走行装置

## はじめに

道路トンネル内における分岐合流部の空気の流れを、実用レベルで理論予測することは困難な状況にあり、殆どのケースで換気計算上、分岐合流部の圧力変化は、断面積の風速変化による圧力変化を考慮するのみにとどまっている。

通常車両走行時のトンネル換気は、トンネル内の視距の確保に加えて、坑口及び入出路からの排気ガス持ち出しを抑制することが環境対策上、重要な目的の1つとなっている。そのため分岐合流部の空気の流れを把握することは、入出路からの排気ガス持ち出しを抑制するための重要な要素といえる。また必要以上に集中排気を上げることによる建設費及びランニング費用の増加を抑えることに寄与する可能性がある。

そこで本報告では、分岐合流部をできる限り現状のトンネルどおりに再現した縮率模型を作

成し模型自動車を走行させ、各種データを測定した。この計測結果を基に換気設計における新たな分岐合流部での損失を導きだし、現状の定常計算との比較検証結果を報告するものである。

## 1. 合流部損失係数の定義

図-1において、合流点を基準としたトンネル本線1→3方向の合流損失係数 $\zeta_{c13}$ とし、1-3区間に修正ベルヌーイの式を適用すると次式の通りとなり、

$$p_{s2} + \frac{\rho}{2} U_{r1}^2 = p_{s3} + \frac{\rho}{2} U_{r3}^2 + \zeta_{c13} \frac{\rho}{2} U_{r3}^2$$

本線間の合流損失係数 $\zeta_{c13}$ は次式のように表される。

$$\zeta_{c13} = \frac{p_{s2} - p_{s3} + \frac{\rho}{2} U_{r1}^2}{\frac{\rho}{2} U_{r3}^2} - 1$$

合流点を基準としたオフランプ→本線(2→3)間の合流損失係数 $\zeta_{C23}$ とし、2-3区間に修正ベルヌーイの式を適用すると次式の通りとなり、

$$p_{s6} + \frac{\rho}{2} U_{r2}^2 = p_{s3} + \frac{\rho}{2} U_{r3}^2 + \zeta_{C23} \frac{\rho}{2} U_{r3}^2$$

オフランプ→本線間の合流損失係数 $\zeta_{C23}$ は次式の通りとなる。

$$\zeta_{C23} = \frac{p_{s6} - p_{s3} + \frac{\rho}{2} U_{r2}^2}{\frac{\rho}{2} U_{r3}^2} - 1$$

ここに、 $p_{si}$  : トンネル内各地点静圧 [Pa]

$U_{ri}$  : トンネル内各地点風速 [m/s]

$\rho$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\zeta_{C13}$  : 本線間(1-3区間)の合流損失係数

$\zeta_{C23}$  : オフランプ～本線間(2-3区間)の合流損失係数

添字1 : 本線(合流前)

添字2 : オフランプ

添字3 : 本線(合流後)

を意味する。

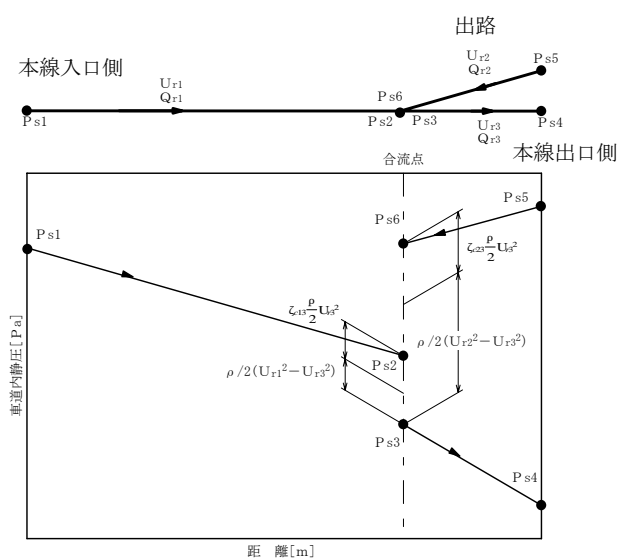


図-1 トンネル内静圧分布模式図

## 2. 実験概要

### 2-1 実験装置

阪神高速で現在計画中の出入路を有するトンネルである淀川左岸線1期東行きトンネルの分岐部形状をモデルとし、縮率1/200模型で透明塩ビ樹脂材を用いて再現した。トンネル断面は、本線標準断面が $A_r=60\text{m}^2$ ,  $D_r=7.6\text{m}$ 、出路断面が $A_r=32.1\text{m}^2$ ,  $D_r=5.7\text{m}$ であるが、縮率模型では、トンネル上部ハンチ部は再現せず矩形断面とし、トンネル幅を調整することによりトンネル断面積を一致させた。また、トンネル内を走行させる模型自動車は、小型車(2000cc 普通乗用車相当)、大型車(8ton 積みトラック相当)の2種類とし、トンネル縮率と同一縮率とした。図-2に実験用模型概要図を示す。

この縮率模型を分岐部を有する模型自動車走行装置に組み込み実験を行った。自動車走行下における車道内濃度分布および坑口持ち出し率を把握するために、路面上からトレーサガスを連続点源状に放出した状態でトンネル内濃度および排気ダクト内濃度を測定した。トンネル内濃度分布、排気ダクト内の濃度の測定およびトンネル内静圧分布の測定には、スキヤニバルブ、濃度分析計、圧力計ならびにコンピュータから成る自動計測システムを用いた。なお、上流側トンネル内流量は加減圧装置により設定可能とした。図-3に測定系統図、写真-1にトンネル模型全景、写真-2にトンネル模型・分岐部付近を示す。

### 2-2 実験条件

#### (1) 交通条件

合流部損失を算出するにあたり、トンネル内を走行する車両の影響を把握するために、車両走行のない場合に加えて、時間交通量2000台(内、出路交通量を500台)を自動車模型の設置間隔を調整することによって再現した。

## (2) 風量の条件

合流部損失係数は本線風量： $Q_{r1}$ ，出路からの合流風量： $Q_{r2}$ ，坑口側の風量： $Q_{r3}$ によって大きく変化することが予測される。よって損失係数を検証するにあたっては， $\zeta_{c13} - Q_{r2}/Q_{r3}$ 及び $\zeta_{c23} - Q_{r2}/Q_{r3}$ の関係を求めることが重要になる。よってトンネルで通常設定される風量配分として， $0 \leq Q_{r2}/Q_{r3} \leq 0.6$ ， $0.4 \leq Q_{r1}/Q_{r3} \leq 1.0$  程度の実験値が得られ

るように排気風量をランダムに変更するものとした。

## (3) 合流角度

出路からの本線合流角度は阪神高速道路の場合概ね  $180^\circ$  に近いため，実験装置の再現限界値である合流角度  $\theta_c = 175^\circ$  を採用した。

## (4) ランプ延長

現在計画中の淀川左岸線1期東行トンネルの大開ランプ約50m（模型縮率1/200）として再

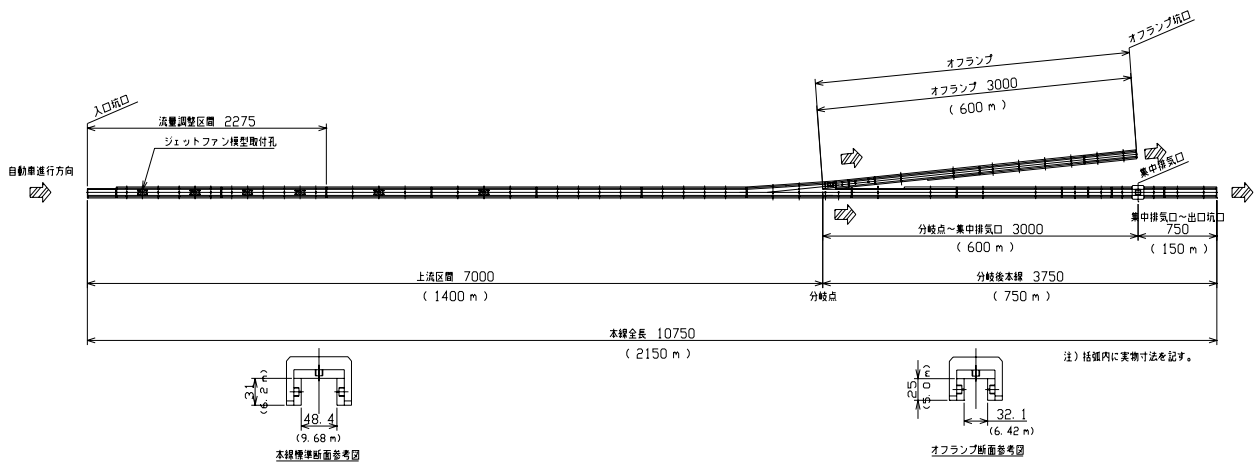


図-2 実験用模型概要図

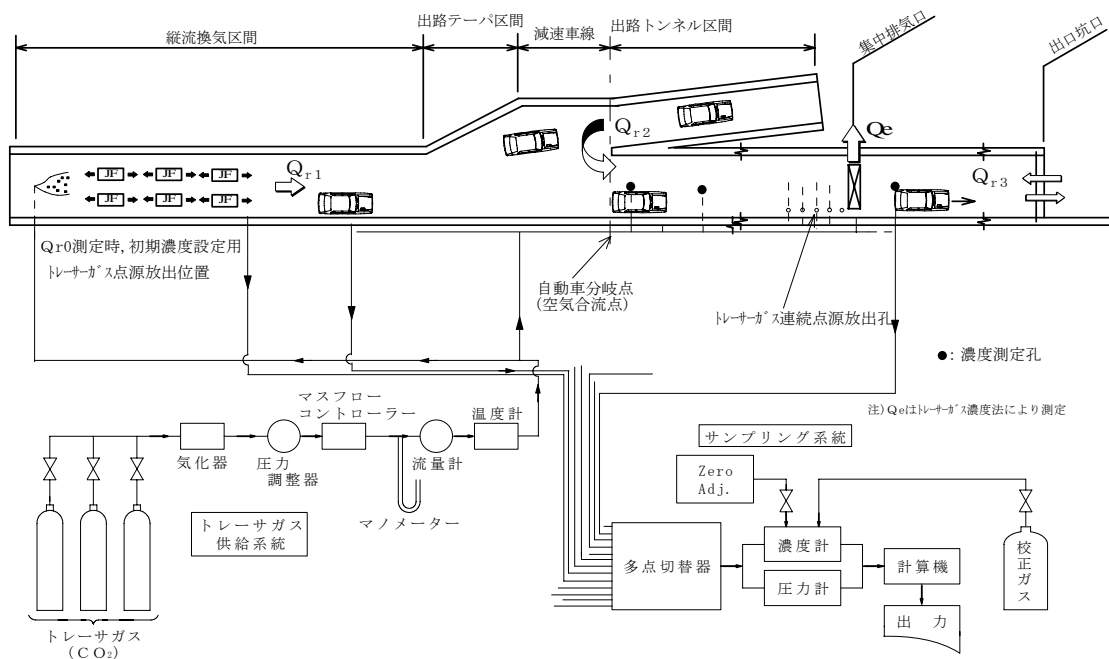


図-3 測定系統図



写真-1 トンネル模型全景

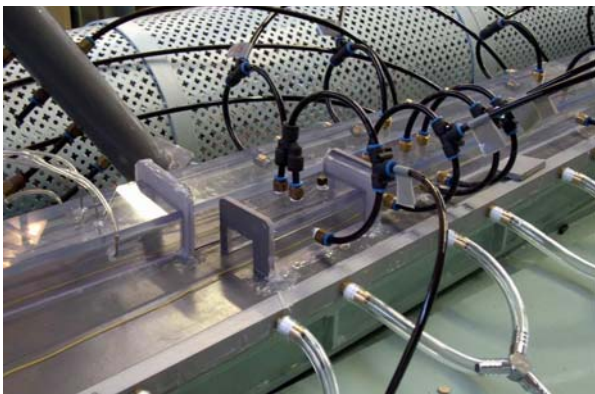


写真-2 トンネル模型・分岐部付近

現した。またランプ延長による損失係数の違いを確認するために600m(模型縮率1/200)も併せて再現した。

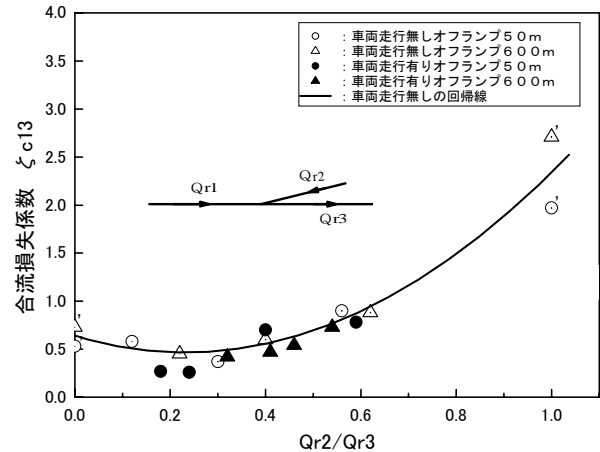
### 3. 実験結果

#### 3-1 合流損失係数 $\zeta_{c13}$ の実験結果

図-4に本線トンネル1→3に対する合流損失係数 $\zeta_{c13}$ とトンネル内流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ の関係を示す。

- ① 合流損失係数 $\zeta_{c13}$ は、トンネル内流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ が大きくなるにしたがい増大する。
- ② 車両走行無しの場合、オフランプ延長50mおよび600m相当の結果を見ると、トンネル内流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}=1$ の時に若干の相違が見られるものの、ランプ延長の変化による合流損失係数 $\zeta_{c13}$ への影響は少ないものと考えられる。

- ③ 車両走行による合流損失係数 $\zeta_{c13}$ への影響を見た場合、車両走行無しの条件と概ね同等の結果が得られたことから、オフランプ延長50m+車両走行有りの条件でややばらつきがあるものの、車両走行の変化による影響は少ないものと考えられる。



回帰式： $\zeta_{c13}=0.63851-1.48084 \cdot (Q_{r2}/Q_{r3})+3.18323 \cdot (Q_{r2}/Q_{r3})^2$

図-4 合流損失係数 $\zeta_{c13}$ と流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ の関係

#### 3-2 合流損失係数 $\zeta_{c23}$ の実験結果

図-5にランプ2→本線トンネル3に対する合流損失係数 $\zeta_{c23}$ とトンネル内流量比 $Q_{r1}/Q_{r3}$ の関係を示す。

- ① 合流損失係数 $\zeta_{c23}$ は、トンネル内流量比 $Q_{r1}/Q_{r3}$ が大きくなるにしたがい減少する。
- ② 車両走行無しの場合、オフランプ延長50mおよび600m相当の結果を見ると、トンネル内流量比 $Q_{r1}/Q_{r3}=1$ の時に若干の相違が見られるものの、ランプ延長の変化による合流損失係数 $\zeta_{c23}$ への影響は少ないものと考えられる。
- ③ 車両走行による合流損失係数 $\zeta_{c23}$ への影響を見た場合、車両走行無しの条件と概ね同等の結果が得られたことから、オフランプ延長50m+車両走行有りの条件でややばらつきがあるものの、車両走行の変化による影響は少ないものと考えられる。

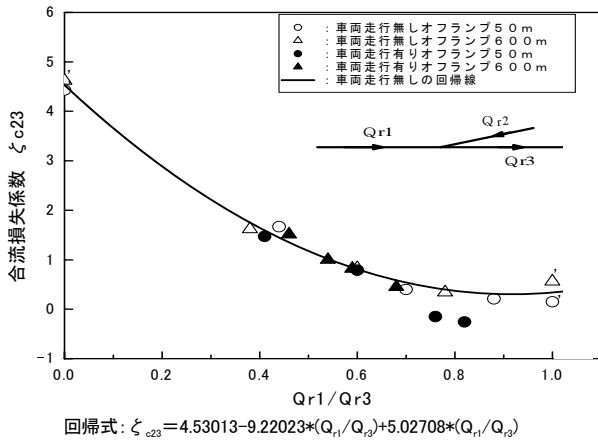
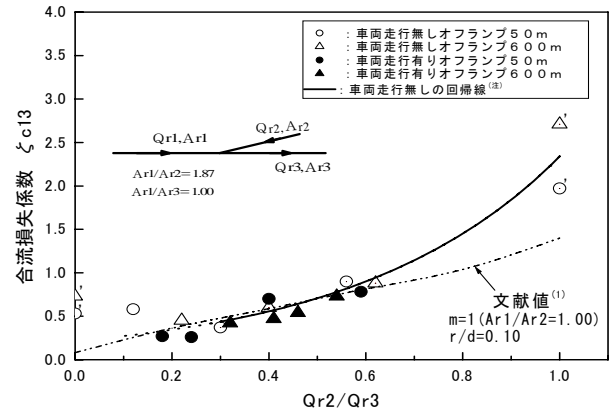


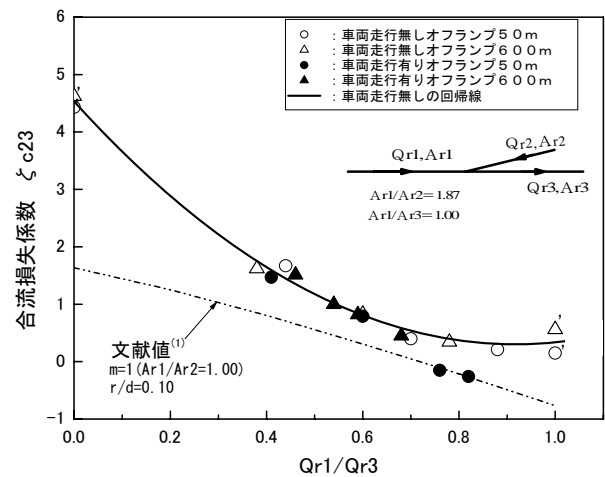
図-5 合流損失係数 $\zeta_{c23}$ と流量比 $Q_{r1}/Q_{r3}$ の関係

#### 4. 文献値との比較

図-6 a), b) に合流損失係数 $\zeta_{c13}$ ,  $\zeta_{c23}$ と流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ ,  $Q_{r1}/Q_{r3}$ の関係について既往の管路及びダクト流体抵抗の文献値と比較した結果を示す. 文献値は, 道路トンネルを考慮したものではなく, 合流角度 $\theta_c = 135\text{deg}$ , 面積比(分岐断面と本線断面の比)1,  $r/d = 0.10$ と条件が異なるため, 損失係数の値が合致しないのは当然であるが, 流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ が小さい領域, または $Q_{r1}/Q_{r3}$ が大きい領域において, 合流損失係数特性の傾向が異なることが分かる. 傾向が異なる要因の一つとして, 合流部の形状の違いが挙げられる. さらに, 本線合流損失特性には減速区間の拡大損失が含まれており,  $Q_{r2}/Q_{r3} = 0$ の場合の合流損失は拡大損失および仕切壁端部の損失となっている. オフランプからある程度の空気流入がある場合は, 拡大損失が緩和され, かつ, 緩和された損失量よりも純粋な合流損失分の増加が小さいことが推測され, 文献値と異なる傾向になると考えられる. なお, オフランプからの流入量がさらに増加すると, 合流損失自体が増加するため, 合流損失係数は増加傾向となる.



a) 合流損失係数 $\zeta_{c13}$ と流量比 $Q_{r2}/Q_{r3}$ の関係



b) 合流損失係数 $\zeta_{c23}$ と流量比 $Q_{r1}/Q_{r3}$ の関係

図-6 文献値との比較

#### 5. 現状定常計算との比較検証

##### 5-1 比較検証条件

本実験により求められた損失係数 $\zeta_{c13}$ ,  $\zeta_{c23}$ を用いて合流損失を見込んだ計算を, 実験値及び現状定常計算値(合流損失を見込まない場合)とで比較するものとした.

比較検証用のトンネルモデルは, 淀川左岸線1期東行トンネルに近い形状を採用した. 図-7に比較検証用トンネルモデルを示す. また比較検証用の交通量としては以下の4通りを再現した.

- ① 時間交通量 2000 台 (内, 出路交通量 500 台)
- ② 時間交通量 1500 台 (内, 出路交通量 100 台)
- ③ 時間交通量 1000 台 (内, 出路交通量 100 台)
- ④ 時間交通量 500 台 (内, 出路交通量 100 台)

なお, 集中排気風量は各条件についてランダムに行ったが, 本報告では代表値として  $Q_e = 800 [m^3/s]$  の場合について報告する。

## 5-2 検証結果と考察

比較検証結果を図-8 から図-11 に示す。

- ① 全体的に合流損失係数を考慮した計算値の方が考慮しない場合よりも実験値に近づいていることが判る。
- ② 入路側交通量の多いケースでは, トンネル内持込風速  $U_{r1}$  は実験値及び計算値共に差異は見受けられない。しかし交通量が少なく

なった場合は実験値の風速の方が大きくなる傾向にある。これは計算値の方は壁面抵抗等, 模型では考慮できない損失を見込んでいるため, 交通量が少ない状態で顕著に差が出たものと思われる。

- ③ ランプ風速  $U_{r2}$ , 本線坑口風速  $U_{r4}$  について見てみると, 合流損失係数を考慮しない現状の定常計算値では  $U_{r2} > U_{r4}$  となっているのに対し, 実験値及び合流損失係数を考慮した計算値では  $U_{r2} < U_{r4}$  と逆転した結果が得られた。現状の定常計算では, 検証モデル用トンネルのような集中排気口からランプが近い場合は, ランプから空気を吸いすぎるため, 本線出口坑口から所定風量を吸込むために集中排気量を増やしていたが, 今回の実験で求めた合流損失を考慮すると, 過剰に集

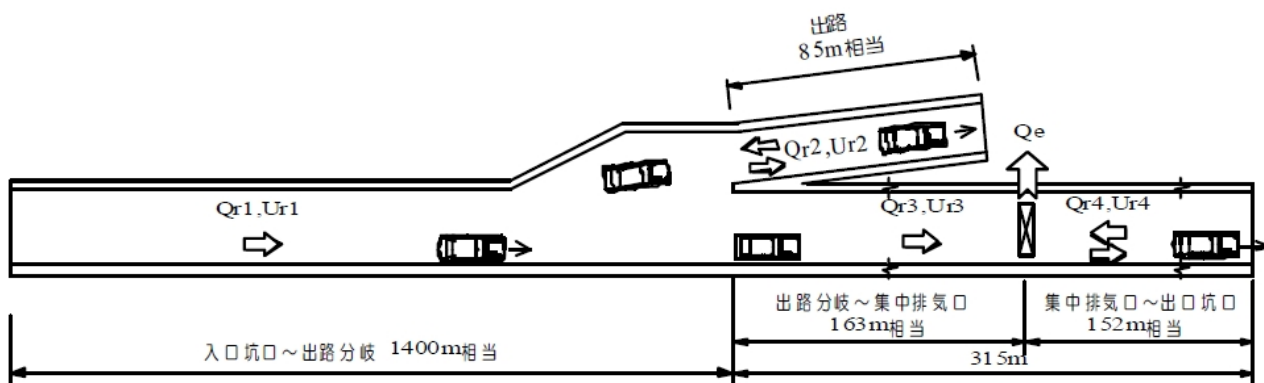


図-7 比較検証トンネルモデル

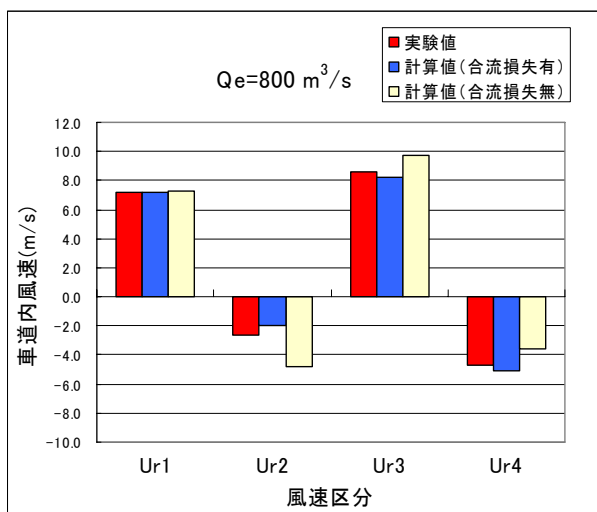


図-8 時間交通量 2000 台  
(内, 出路交通量 500 台)

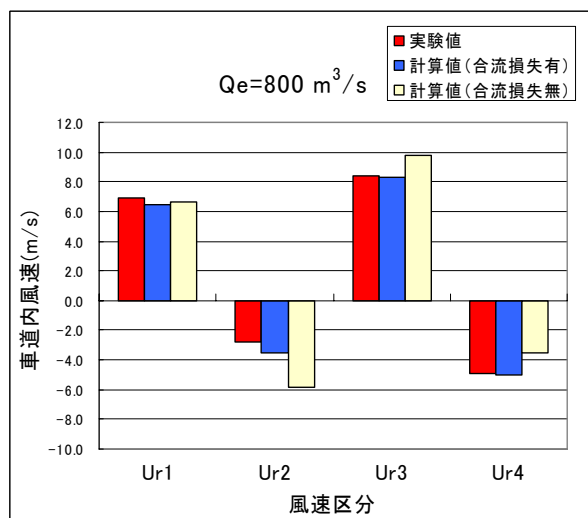


図-9 時間交通量 1500 台  
(内, 出路交通量 100 台)



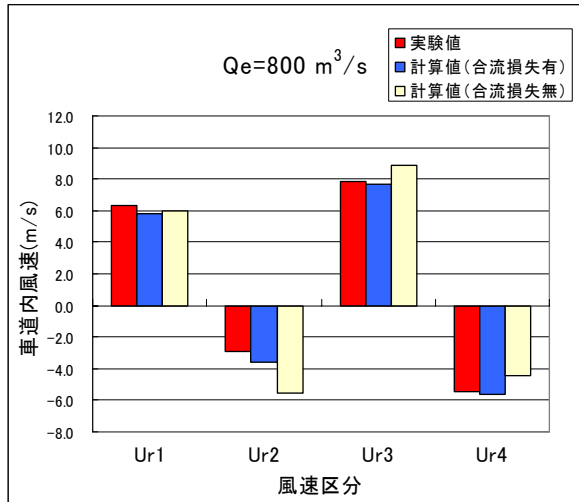


図-10 時間交通量 1000 台  
(内, 出路交通量 100 台)

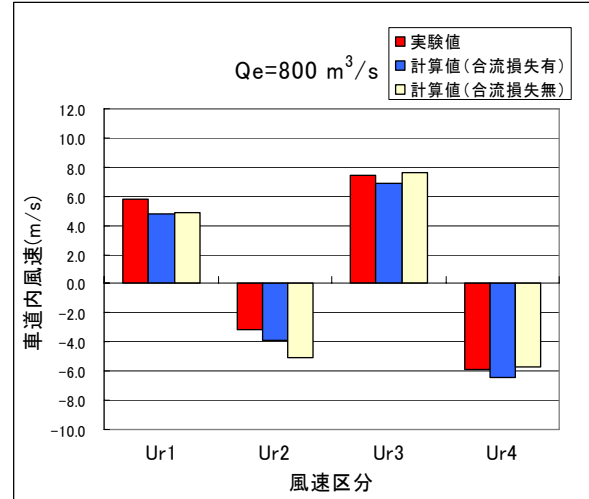


図-11 時間交通量 500 台  
(内, 出路交通量 100 台)

中排気風量を大きくすることを回避できることになる。

- ④ 時間交通量 2000 台 (内, 出路交通量 500 台) において, ランプ風速  $U_{r2}$  を見ると, 合流損失を見込んだ計算値が実験値を下回る傾向を示している. 他の条件よりもランプ交通量が多いにもかかわらず, 実験値の方が本線への空気流入が多くなる結果となった。

### まとめと今後の課題

換気設計における新たな損失係数として, トンネル分岐合流部における損失を実験計測し, 合流部損失係数の回帰式を求めるに至った. また本実験で求めた合流部損失係数を実施設計に反映させ, 実験値及び現状の定常計算結果と比較検証した. その結果, 分岐合流部損失を見込んだ方が, より実験値に近づき, かつ風量分布においても同じ傾向を示すことが確認できた. 今後この新たな分岐合流損失係数を使用することにより, より精度の高い換気設計及び正確な換気制御に寄与するものと考えられる. また比較実験で見られたように, ランプからの吸い込みが現状定常計算値に比べて小さくなるため,

集中排気風量は削減傾向となり, 建設費及びランニング費用共に削減が期待される。

本実験において, 概ね車両走行時の合流損失係数と車両走行無しの合流損失係数は差異がないものと判断したが, ランプ交通量が多い場合の損失係数が若干ではあるが減少傾向となった. 今後ランプ交通量が多い場合の合流損失係数について更に検証が必要であると考えられる. また, 本実験で使用したモデルは本線部及びランプ部共に開削トンネル断面となっており, 今後本線部がシールド断面になり, ランプとの断面積比率が大きく異なった場合の損失係数の検証も必要になるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 社団法人 日本機械学会 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編 「技術資料 管路・ダクトの流体抵抗」
- 2) 分・合流部を有する道路トンネルの換気流れ—分・合流模擬自動車走行装置と実験例— (エバウ時報第 152 号抜刷)
- 3) 換気施設設計資料収集作成業務報告書平成 11 年度 (阪神高速道路公団)
- 4) トンネル換気設備等計画検討委員会平成 15 年度 (阪神高速道路公団)

# EXPERIMENT REPORT ON VENTILATION DESIGN OF URBAN TUNNEL

Kazuhiro Ajihara and Koichi Horikoshi

Latest urban road tunnels tend to extend for more than 3 km and contain merging and diverging points inside, as seen in those on the Hanshin Expressway Yodogawa Sagan and Yamatogawa Routes. In many of them release of polluted tunnel air from the portals is controlled properly. Such environmentally considered design of ventilation requires complicated calculation of pressure loss.

In this experiment the authors determined pressure loss coefficient for merging/diverging sections to be used in ventilation calculation, using a tunnel model with a diverging section and model vehicle running system. The current study provides basic quantitative data for tunnel ventilation design and makes contribution to environmental measures, enabling higher precision design and more accurate control of tunnel ventilation.

味原 和広



阪神高速道路株式会社  
建設事業部 工事調整グループ  
Kazuhiro Ajihara

堀越 廣一



阪神高速道路株式会社  
情報システム管理室 情報システムグループ  
Koichi Horikoshi