

縦流換気式の対面交通トンネルにおける 換気モデルの検討

AN EXAMINATION OF THE LONGITUDINAL VENTILATION MODEL FOR TWO-WAY TUNNEL

箕作 幸治*・武山 泰**

By Kouji MITSUKURI and Yasushi TAKEYAMA

In this paper, the longitudinal ventilation model for two-way tunnel was examined. Taking the variations of time headway and exhaust emission into consideration, the fluctuations of the concentrations of exhaust emission in two-way tunnel can be evaluated by the computer simulation model illustrated in this study. The sufficient ventilation air flow for acceptable condition can be also evaluated by means of the simulation.

Key Words : tunnel ventilation, two-way traffic, simulation

1. はじめに

近年のトンネル掘削技術の進展にともなって、トンネル延長が長大化してきており、また、都市内における土地の有効利用の観点から、掘削構造道路や大深度地下道路の計画が進められてきている。このような中、道路環境に対しては一層の快適性が求められてきており、トンネル内の視環境の改善の観点からもトンネル換気の検討は重要な課題となってきた。

道路トンネルの換気において、一方向交通の縦流換気方式に関しては所要換気量等の評価手法はほぼ確立していると言える。ところが、現行の所要換気量の算定方法では一方向交通、対面交通といった交通方式の差異や、縦流式、横流式といった換気方式の違い、また、自動車の速度の変動や車頭時間の変動といった要素が換気モデルに十分に反映されているとはいえない。また、掘削構造道路とトンネルが断続的に現れるような複雑な道路構造において車道内の濃度を評価することも困難となっている。

現行の技術基準¹⁾においてはトンネル内の濃度の平均に標準偏差の3倍を加えた値が基準濃度を下回る換気量を所要換気量として算定しているが、換気モデルにおける濃度変動の評価や自動車からの排出ガス量の変動の把握については必ずしも十分とは言えず、基準濃度を超える時間比率が設計において考慮した値を上回る事例も見受けられる。また、換気の基準濃度およびその濃度に対する所要換気量の算定の考え方の根拠もあまり明確ではない。

* 学生員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北大学講師 情報科学研究科 人間社会情報科学専攻 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

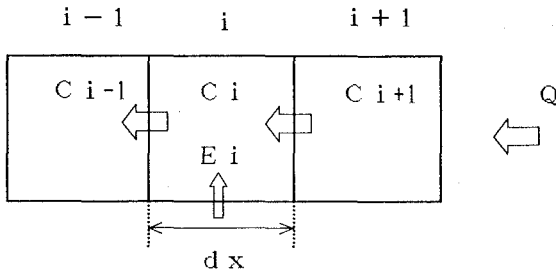


図 1 一方向交通における換気モデル

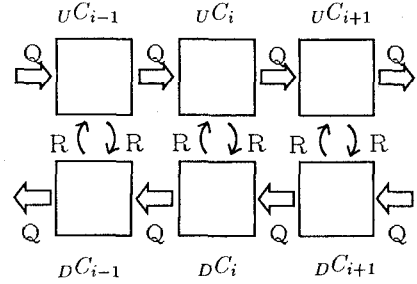


図 2 対面交通における換気モデル

本研究では、一方向交通トンネルにおける換気モデルの考え方を拡張することにより対面交通トンネルにおける車道内の濃度を表す式を検討し、合わせてその考え方に基づいたシミュレーションモデルの開発を行った。また、このモデルを用いた、対面交通トンネルにおけるトンネル内の排出ガス濃度分布およびその時間変動の評価、それに基づく所要換気量の算定について検討を行った。そして、このモデルに基づくシミュレーションによるトンネル内の濃度変動と実際の対面交通トンネルでの実測値とを比較した。

2. 対面交通における換気モデル

(1) 一方向交通トンネルにおける換気モデル

一方向交通トンネルにおける換気モデルとして、図-1に示すようなモデルが考えられている。このモデルでは、トンネル内を微小区間に分割して考える。対象とするトンネルの微小区間 $i-1$, i , $i+1$ のそれぞれの濃度を C_{i-1} , C_i , C_{i+1} とする。微小区間内では濃度は一定であるとする。このとき、換気風によって区間 $i+1$ から区間 i に持ち込まれるばい煙量 q_i は、次の様に表される。

$$q_i = C_{i+1} \cdot Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

C_{i+1} : 区間 $i+1$ におけるばい煙濃度 [1/m]

Q : 換気風量 [m^3/s]

また、区間 i を自動車が通過する際にばい煙が排出されるので、その量を E_i とする。換気風によるばい煙の区間 i での収支を表すと次のような式となる。

$$C_{i+1} \cdot Q + E_i - C_i \cdot Q = dC \cdot A \cdot dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

A : トンネル断面積 [m^2]

dx : トンネル内の微小区間延長 [m]

dC : 区間 i での濃度変化

(2) 対面交通トンネルにおける換気モデルへの拡張

今回、図-1 のモデルを拡張することによって対面交通に適用する。対面交通トンネル内での空気の流れは複雑で、対向する車線間での空気の流出入による混合作用が生じている。このことを考慮するために、図-2 のようにトンネル内を上下車線毎の微小区間に分割して考える。このとき、対象とするトンネルの微小区間 $i-1$ 、 i 、 $i+1$ のそれぞれの車線毎の濃度を上りは ${}_UC_{i-1}$ 、 ${}_UC_i$ 、 ${}_UC_{i+1}$ 、下りは ${}_DC_{i-1}$ 、 ${}_DC_i$ 、 ${}_DC_{i+1}$ とする。このモデルにおいては、風向は車線毎に自動車の進行方向と同方向としている。区間 i での自動車が排出するばい煙量を上りは ${}_UE_i$ 、下りは ${}_DE_i$ とする。上下車線間の混合については、下り車線から上り車線に持ち込まれるばい煙量を ${}_DC_i \cdot Q'$ とし、上り車線から下り車線に持ち出されるばい煙量を ${}_UC_i \cdot Q'$ とすると、 Q' は次の式で表される。

$$Q' = R \cdot H \cdot dx \dots\dots\dots (3)$$

R : 車線間の混合量 [m/s]

H : トンネル内の内空高さ [m]

以上のことから、換気風によるばい煙の区間 i での収支を表すと、次のような式となる。

$${}_UC_{i-1} \cdot Q - {}_UC_i \cdot Q + {}_UE_i + {}_DC_i \cdot Q' - {}_UC_i \cdot Q' = dC \cdot \frac{A}{2} \cdot dx \dots\dots\dots (4-a)$$

$${}_DC_{i+1} \cdot Q - {}_DC_i \cdot Q + {}_DE_i - {}_UC_i \cdot Q' - {}_DC_i \cdot Q' = dC' \cdot \frac{A}{2} \cdot dx \dots\dots\dots (4-b)$$

3. 対面交通トンネルにおける濃度式

(1) トンネル内濃度の基本式

実際の対面交通のトンネル内の空気の流れは、上り・下り方向の交通量の変動等の影響により、トンネル内で振動するような動きを示すとともに、車両による引きずり、車両の前方から後方への廻り込み、また、対向する車線間での混合等の複雑な挙動を示すと考えられるが、これらの時間平均的な流れについては、各車線間で空気の混合が行われていると考えることができる。

道路構造としてトンネル、掘割道路など、交通条件として一方向あるいは対面交通、排出ガスの排出条件として線源・点源を考慮することによって微分方程式（対面交通の場合には連立微分方程式）が得られ、濃度式が解として導かれる。²⁾

このような濃度式を用いることによって、構造条件が部分的に異なる時にも、道路内の空気の流れの連続性を考えた同一の概念によって道路上の濃度を表現することができる。

対面交通トンネルにおいては、それぞれの車線に対して独立した流れ、反対車線との空気の交換を考えることによって、基本的モデルを導き出すことができる。反対車線間の空気の交換に関しては、これが時間当たりの縦断・横断面の単位面積当たりの体積として表現される。

また、掘割構造道路においては車道内と外部の空気が開口部を通じて交換されることから、この作用（呼吸作用）により換気が行われることになる。これは横流式の換気トンネルについても同様に考えることができる。

一方の車線の微小区間に流入する自動車排出ガスとしては、同一車線上の上流側および対向車線から流入してくるものと、その車線の微小区間内で自動車から排出されるものがあり、流出するものとしては、同一車線の下流側および対向車線へ流出するものである。さらに掘割構造あるいは横流式のトンネルにおいては開口部あるいはダクトを通じての流出を考慮することが必要となる。

以上のことを考慮することによって、各車線の微小部分当たりの空気の流れの出入りと、汚染物質の質量の収支を考えたトンネル内濃度の基本式として以下の連立微分方程式が得られる。

$$C_U \cdot Q_U + E'_U \cdot dx + C_D \cdot R \cdot H \cdot dx = (C_U + dC_U) \cdot Q_U + C_U \cdot R' \cdot w_D \cdot dx + C_U \cdot R \cdot H \cdot dx \quad (5-a)$$

$$(C_D + dC_D) \cdot Q_D + C_U \cdot R \cdot H \cdot dx + E'_D \cdot dx = C_D \cdot Q_D + C_D \cdot R' \cdot w_D \cdot dx + C_D \cdot R \cdot H \cdot dx \quad (5-b)$$

U, D : 上り線 (U)、下り線 (D) の別

Q_U, Q_D : 各車線内の空気流量 (換気風量)

C_U, C_D : 各車線内の濃度

E'_U, E'_D : 各車線の自動車排出ガスの排出強度

w_U, w_D : 掘割の場合の各車線の開口幅

R : 単位混合量

R' : 単位呼吸量

(2) 対面交通トンネルの場合の濃度式の解法

濃度式の記述を簡単にするため、以下に示す $a \sim f$ を導入する。

$$\begin{aligned} \frac{R' \cdot w_U}{Q_U} + \frac{R \cdot H}{Q_U} &= a, \quad \frac{R \cdot H}{Q_U} = b, \quad \frac{E'_U}{Q_U} = e, \\ \frac{R \cdot H}{Q_D} &= c, \quad \frac{R' \cdot w_D}{Q_D} + \frac{R \cdot H}{Q_D} = d, \quad \frac{E'_D}{Q_D} = f \end{aligned}$$

これを用い、式 (5) の濃度の基本式から次の連立微分方程式が得られる。

$$\frac{dC_U}{dx} = -a \cdot C_U + b \cdot C_D + e \quad (6-a)$$

$$\frac{dC_D}{dx} = -c \cdot C_U + d \cdot C_D + f \quad (6-b)$$

ここでは、対面交通トンネルにおいて上下方向の風量が等しい場合を考慮する。通常の換気モデルにおいては、上下方向の交通量が等しい場合には互いの交通換気力が打ち消し合うことにより、トンネル内を空気が流れなくなるものと考えられている。このような場合においてもトンネル内の濃度が極端に高濃度とはならないことから、換気において軸方向拡散を考慮するモデルなどが提案されている³⁾。本モデルにおいては、それぞれの車線内に対向する等しい風量の流れが存在すると考えるもので、このような場合においても交通換気力が作用することになる。実際、模型自動車走行装置などを用いて定常的な交通を再現した室内実験においては、それぞれの車線に沿った独立した空気の流れが観測されている。

$Q_U = Q_D, R' = 0$, 線源排出の場合、 $a = b = c = d$ となって、濃度式は次のように得られる。

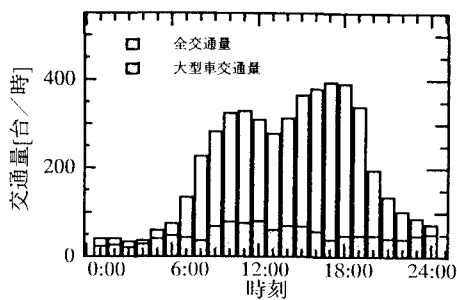


図 3 上り交通量

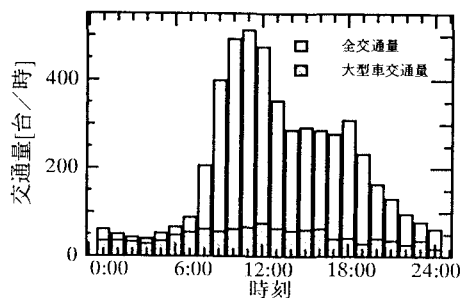


図 4 下り交通量

$$C_U = -\frac{1}{2} \cdot b \cdot (e + f) \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2 \quad \dots\dots\dots (7-a)$$

$$C_D = -\frac{1}{2} \cdot b \cdot (e + f) \cdot x^2 + C_3 \cdot x + C_4 \quad \dots\dots\dots (7-b)$$

x : 距離

$$C_3 = C_1 - (e + f)$$

$$C_4 = C_2 + \frac{C_1 - e}{b}$$

導かれた濃度式は、2つの未知定数を含むことになるが、模型実験や、トレーサーガスを用いた現地実験結果において、各車線それぞれ2点における車道内濃度と各車線内の空気流量を把握することによって濃度式が得られる。

対面交通トンネルを考えた実験が模型自動車走行装置を使って行われている。対面交通で上り車線と下り車線の空気風量が等しいとおいいた換気条件の下での実験で単位呼吸量を求め、各車線の入口、出口における濃度を境界条件として与えることにより、トンネル内の軸方向に沿った濃度分布を評価することが可能になる。

4. 実測値とシミュレーション値との比較

(1) トンネル内濃度のデータ

シミュレーションの対象としたトンネルは、山形自動車道の白髭トンネル（2車線対面交通トンネル、全長492.0[m]）である。白髭トンネル内の測定項目は、透過率（VI）、車道風速である。交通量に関してはこのトンネルでは測定されておらず、約1 Km 西方の山形蔵王I.C. で測定されている値を用いることにした。

まず、ある1日（92.6.24(水)）の上下車線毎の全時間交通量、大型車時間交通量を図-3、図-4に示す。そして、同じ日の透過率計（上り車線に設置）の実測値から求められるばい煙濃度の時間変動（5分毎のプロット）を図-5に示す。

(2) シミュレーションモデルの概要

次に、図-2で示されるモデルを用いてシミュレーションを行なった。トンネル全体を上下車線毎に50個、計100個の微小区間に分割し、各微小区間内では濃度は一定であるとする。車からの排出量、換気風および車線間の混合による各微小区間毎のばい煙の収支計算を式（4）により1秒毎に行う。トンネル内に進入する

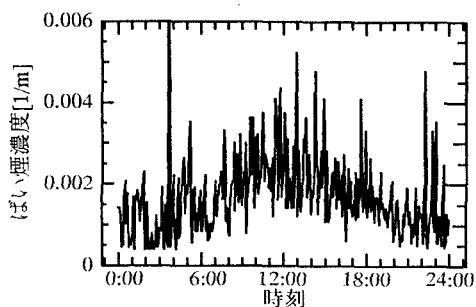


図 5 実測データから計算したばい煙濃度

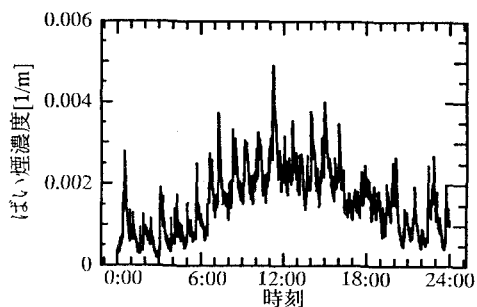


図 6 シミュレーションによる計算値

自動車は同日の1時間毎の実測データをもとに、対応する時間毎の交通量、大型車混入率をもとに乱数を用い車頭時間間隔を与えた。この際、乱数の中でも車頭時間分布に最適と思われるシフトした指数乱数を使用した。排出ガス(ばい煙)量に関しては、排出係数(小型車:0.218, 大型車:3.59 [m²/km])⁴⁾を与え変動係数を2.0とした対数正規乱数列により各自動車毎の排出ガス量を決定した。風向は車線毎に自動車の進行方向と同方向とし、風速は実測データの値を参考に2[m/s]で一定とした。また、上下車線間の単位混合量 R は0.2[m/s]とした⁵⁾。図-6に、その結果を示す。(濃度は、上り車線の実測区間に対応した区間の平均値とした。)一日を通しての濃度変化の傾向はよく再現できたと思われるが、濃度のばらつきやその変動に相違がみられる。

5. まとめ

本研究では、対面交通トンネル内の排出ガス濃度を表現するシミュレーションモデルを作成し、実測値との比較を行なった。実測値と計算値との間には定量的な評価が必要であり、検定やスペクトル解析等を行う予定である。今後、本換気モデルに基づいた所要換気量の算定方法について検討を進めたい。また、対面交通における換気モデルを拡張することによって掘割道路およびトンネルと掘割道路が組合わさった複雑な道路に対する評価を行い、一方縦流換気トンネル・対面交通トンネル・掘割構造道路における統一した換気モデルを開発する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準(換気編)・同解説, 1985.
- 2) Yasushi TAKEYAMA : Evaluation of Automobile Exhaust Emission Concentration in Tunnels and Depressed Roads, International Conference on Physical Modeling of Transportation and Dispersion, pp.10B.13~18, August 7-10, 1990.
- 3) 水谷 敏則・堀内 浩三郎：対面交通トンネル内における自動車の排気ガス拡散, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.430~431, 1989.
- 4) 武山 泰・福田 正・佐藤 敬：トンネル内濃度測定値からの車種別自動車排出ガス量の推定, 第19回日本道路会議一般論文集, pp.294~295, 1991.
- 5) 清水 博・足立 義雄・辻 靖三・根本 守：道路環境, 山海堂, pp.181~182, 1987.