

IV-2 トンネル内の自動車排出ガス濃度の確率的評価方法

東北大学 正 員 武 山 泰

1. はじめに

自動車からの排出ガス量（排出係数）を把握する方法の一つとしてトンネル内の濃度から間接的に推定する方法があり、排出係数の検証等に用いられている。トンネル内の濃度から排出係数を把握するためには、換気方式、車頭間隔、排出量のばらつき等を考慮に入れてトンネル内の濃度を確率的に評価するモデルが必要となる。

2. トンネル内濃度の平均・分散の一般的記述

i 台前にトンネル内に進入した車両が、トンネル内を走行する間に x_i の排出ガスを排出し、その車両の現時点の濃度への影響が $a_i \cdot x_i$ で表わせるものとする。このとき、トンネル内の濃度 c は、過去に通過した車両の影響を全て加えあわせることにより次式で表わされる。

$$c = \sum a_i \cdot x_i$$

各自動車からの排出ガス量が、平均値 μ 、分散 σ^2 の分布に従うものとする、濃度 c の平均値 μ_c および分散 σ_c^2 は次式となる。

$$\mu_c = \sum a_i \cdot \mu_{x_i} = \mu \cdot \sum a_i$$

$$\sigma_c^2 = \sum (a_i \cdot \sigma_{x_i})^2 = \sigma^2 \cdot \sum (a_i)^2$$

3. 車頭間隔等を考慮したいくつかの換気モデル

(1) 等間隔・集中排気モデル（モデルⅠ）¹⁾

延長 L_R (m)、断面積 A_R (m²)、容積 $A (= A_R \cdot L_R)$ (m³) のトンネルに対し、①自動車はトンネル内に平均車頭時間 T (sec) に等しい時間間隔で進入し、②トンネル内を走行する間に排出するガスの全量をトンネル内に進入した時刻に集中して排出、③排出されたガスはトンネルの全容積に速やかに拡散し、④ Q (m³/s) の換気により T 秒間に、トンネル内のガスのうち、 $Q \cdot T / A$ がトンネル外に排除されるものとする。このとき、 $i \cdot T$ 秒前に進入した車両の影響は、 $r^i \cdot x_i / A$ (ここで、 $r = 1 - Q \cdot T / A$) で表わされる。これより影響の係数は、

$$a_i = r^{i-1} / A \quad (i = 1 \sim \infty)$$

となり、等比数列の和の公式を用いることにより、

$\sum a_i$ 、 $\sum (a_i)^2$ は次式により求められる。

$$\sum a_i = 1 / A \cdot (1 - r)$$

$$\sum (a_i)^2 = 1 / A^2 \cdot (1 - r^2)$$

(2) 車頭間隔の変動・時間当りの排出ガス量を考慮したモデル（モデルⅡ）

①' 車両のトンネル内への進入をポアソン過程でモデル化 (Δt 秒間にトンネル内に車両が進入する確率が $p = \Delta t / T$ 、2 台以上進入することはない)、②' 各車両は、トンネル内を $N \cdot \Delta t$ 秒間で走行し、 Δt 秒毎に x_i / N の排出ガスを排出、④' 換気により Δt 秒間に、トンネル内のガスのうち $Q \cdot \Delta t / A$ がトンネル外に排除されるものとする。このとき、

$$a_i = \sum_{k=1}^i r^{k-1} / N \quad (i \leq N)$$

$$= r^{i-N} \cdot a_N \quad (i > N)$$

(ここで、 $r = 1 - Q \cdot \Delta t / A$)

となり、 $\sum a_i$ 、 $\sum (a_i)^2$ は、次式となる。

$$\sum a_i = 1 / A \cdot (1 - r)$$

$$\sum (a_i)^2 = \frac{N - 2r(1 - r^N) / (1 - r^2)}{(1 - r)^2 \cdot A^2 \cdot N^2}$$

車頭間隔の変動を考慮すると、 Δt 秒毎にトンネル内に進入する自動車からの排出量の分布は、 Δt 秒間にトンネル内に車両が進入する場合（確率 $p = \Delta t / T$ ）には平均 μ 、標準偏差 σ の分布に従い、進入しない場合（確率 $q = 1 - \Delta t / T$ ）には、0 として合成される。合成された分布の平均 μ' 、および分散 σ'^2 は次式で表わされる。

$$\mu' = (\Delta t / T) \cdot \mu$$

$$\sigma'^2 = \sigma^2 \frac{\Delta t}{T} \left[1 + \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \right) \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

(3) 縦流換気を考慮したモデル（モデルⅢ）

縦流換気の一方交通トンネルに対し、軸方向の空気の乱れやガスの拡散がないものとして、図-1 に示すモデルを考える。車両の走行速度を V (m/s)、換気風速を $V_R (= Q / A_R)$ (m/s) とすると、車両の濃度への影響 c_{arr} は車両のトンネル内への進入と

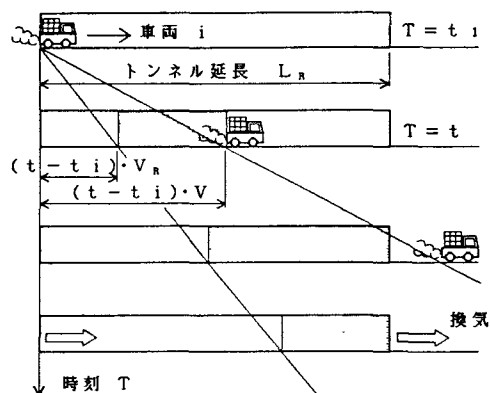


図-1 一方向交通トンネル縦流換気モデル

同時刻にトンネル内に引き込まれた空気境界から、車両が走行した位置までの区間に対して等しく、

$$C_{air} = \frac{X_i}{(1 - V_R/V) \cdot A}$$

となる。時刻 t 、距離 l における濃度は、時刻 t_i にトンネル内に進入した車両について時刻 t に距離 l の地点を車両が通過し $((t - t_i) \cdot V > l)$ 、かつ、同時刻にトンネル内に引き込まれた空気境界が l を通過していない $((t - t_i) \cdot V_R < l)$ 場合にそれらの影響を加えて求めることができる。このとき影響の係数は $a_i = 1 / (1 - V_R/V) / A$ であり $\sum a_i$ 、 $\sum (a_i)^2$ は、次式となる。

$$\sum a_i = \frac{N}{(1 - V_R/V) \cdot A}$$

$$\sum (a_i)^2 = \frac{N}{(1 - V_R/V)^2 \cdot A^2}$$

(ここで、 $N = \frac{l/V_R - l/V}{\Delta t}$)

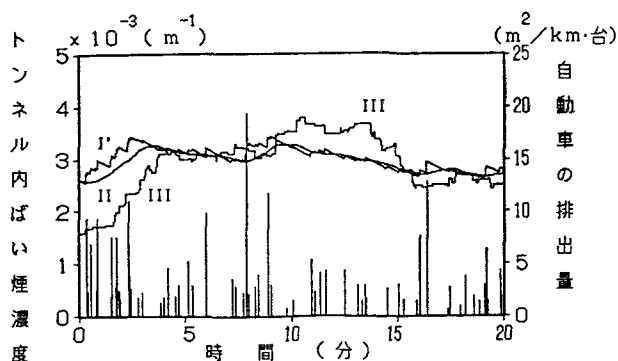


図-2 トンネル内濃度の時間変動

4. モデルの比較

(1) トンネル内濃度の時間変動特性

モデル I～III について、シミュレーションから得られた濃度変動を図-2 に示す。ここでは比較のために、モデル I についても車両の進入をポアソン過程として扱っている (モデル I')。

モデル I' の濃度の変動が「のこぎりの歯」状であるのに対し、時間当りの排出量を考慮したモデル II では、濃度の変動はなだらかであり、縦流換気を考慮したモデル III では、「階段」状の変動となっている。

(2) 所要換気量

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 (所要換気量) を、交通量およびモデルを変化させて算出した結果を図-3 に示す。

車頭間隔の変動を考慮しない場合と、考慮した場合とでは、交通量が低い場合に所要換気量の差が相対的に大きくなっている。また、縦流換気を考慮したモデル III では、他のモデルに比べ所要換気量の値が大きくなっている。

5. まとめ

縦流換気が行われる一方向交通トンネル内の濃度を確率的に評価するモデルを作成し検討したところ、所要換気量が従来のモデルに比べ大きく算出される結果となった。今後の課題としては、実測値との照合、トンネル軸方向の空気の乱れや拡散の影響の検討等が挙げられる。

参考文献

- 『道路トンネル技術基準(換気編)・同解説』
(社)日本道路協会, 昭和60年12月

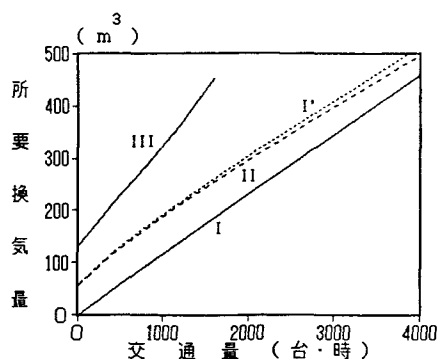


図-3 交通量と所要換気量