

車頭時間変動を考慮した 一方向交通トンネルの縦流換気モデル

LONGITUDINAL VENTILATION MODEL FOR ONE-WAY TRAFFIC TUNNEL IN CONSIDERATION OF TIME HEADWAY DISTRIBUTION

武山 泰*・福田 正**

By Yasushi TAKEYAMA and Tadashi FUKUDA

To maintain environmentally acceptable conditions in tunnels, the ventilation systems have to be designed properly. For this purpose, the ventilation models for each system, which can evaluate the concentration in tunnels adequately, are needed. To provide adequate visibility for drivers, the ventilation level is determined considering both mean value and standard deviation of smoke concentration. The standard deviation of concentration is much affected by not only distribution of vehicular emission but also time headway distribution. In this paper, a longitudinal ventilation model for one-way traffic tunnel is described. This model considers the time headway distribution of vehicular traffic.

Key Words : ventilation, longitudinal ventilation, time headway

1. まえがき

近年、トンネル掘削技術の進展、都市内における地価の高騰、また高速道路の建設が縦貫道路から横断道路へと移行してきていることなどから、都市内・都市間を問わず、建設されるトンネルの件数が増大するとともに、トンネルの長大化が顕著になってきている。このようにトンネル施設のストックが増大してくるにつれ、トンネルの維持管理の合理化が強く求められるようになり、換気施設の効率的な運用やトンネル壁面の清掃の自動化などに関する研究が行われるようになってきている。

トンネルの換気制御に関しては、ファジィ制御の適用が検討されてきており、一方向交通トンネルの縦流換気方式に関する制御システムはほぼ完成の域に達したとされている¹⁾。しかし、その他の換気方式に関しては制御システムが十分に確立されていない。この理由のひとつとして、採用される換気方式に対してトンネル内の濃度を適切に表現する換気モデルが構築されていないことがあげられる。特に、視距に対するばい煙の透過率に対しては、トンネル内の濃度の平均および標準偏差を適切に評価できるモデルが必要となる。本研究においては、一方向交通の縦流換気方式を対象に、車頭時間の変動および縦流換気によるトンネル内の空気の流れを考慮した換気モデルの構築を行った。

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寄与が $a_i \cdot x_i$ 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寄与

* 工修 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

を全て加えあわせることにより次式で表わされる²⁾.

$$c = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot x_i \dots\dots\dots (1)$$

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.

$$\mu_c = \sum a_i \cdot \mu_{x_i} = \mu \cdot \sum a_i \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_c^2 = \sum (a_i \cdot \sigma_{x_i})^2 = \sigma^2 \cdot \sum a_i^2 \dots\dots\dots (3)$$

自動車からの排出ガス量は一般に、大型車・小型車、または、ディーゼル車・ガソリン車の2車種分類で考慮されている. それぞれの車種を車種1・車種2とし、各車種の自動車からの排出量の平均が μ_1 , μ_2 , 分散が σ_1^2, σ_2^2 で与えられるものとする. このとき、自動車全体としての排出量の分布の平均 μ および分散 σ^2 は、各車種の混入率 P_1 , $P_2 (= 1 - P_1)$ を用いることにより、次式で表される.

$$\mu = P_1 \cdot \mu_1 + P_2 \cdot \mu_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma^2 = P_1 \cdot [\sigma_1^2 + (\mu_1 - \mu)^2] + P_2 \cdot [\sigma_2^2 + (\mu_2 - \mu)^2] \dots\dots\dots (5)$$

3. 車頭時間変動を考慮した縦流換気モデルの構築

車頭時間の変動および縦流換気におけるトンネル内の空気の流れを考慮した換気モデルを構築するため、トンネル内への車両の進入が等間隔で、換気風の流れおよび自動車交通の方向が特定されない換気モデルに対し、まず車頭時間の変動を考慮し、つぎに一方方向交通の縦流換気を考慮することによりモデルの拡張を行う.

(1) 等時間間隔・集中排気モデル (モデル I)

延長 $L_R(m)$, 断面積 $A_R(m^2)$, 容積 $A (= A_R \cdot L_R)(m^3)$ のトンネルに対し、次の i) ~ iv) の条件を考慮した換気モデルを考える.

- i) 自動車が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
- ii) 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
- iii) 排出されたガスはトンネルの全容積に速やかに拡散
- iv) $Q(m^3/s)$ の換気により T 秒間に、トンネル内のガスのうち、 $\frac{Q \cdot T}{A}$ がトンネル外に排除される

このとき、 $i \cdot T$ 秒前に進入した車両の寄与は、 $\frac{r_i \cdot x_i}{A}$ (ここで、 $r = 1 - \frac{Q \cdot T}{A}$) で表わされる.

これより式(1)の a_i は、

$$a_i = \frac{r^{i-1}}{A} \dots\dots\dots (6)$$

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.

$$\sum a_i = \frac{1}{A(1-r)} \dots\dots\dots (7)$$

$$\sum a_i^2 = \frac{1}{A^2(1-r^2)} \dots\dots\dots (8)$$

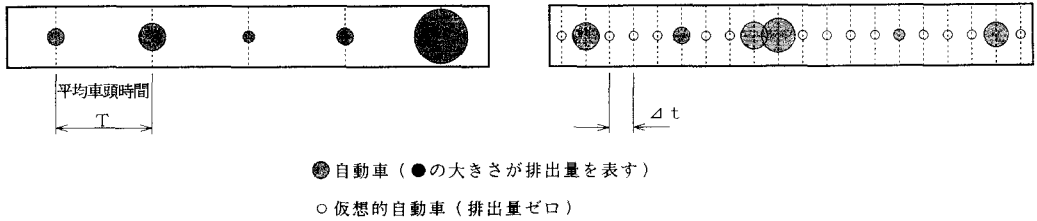


図-1 車頭時間変動の考慮

(2) 車頭時間の変動・時間当りの排出ガスを考慮したモデル (モデル II)

車頭時間の変動は、車両のトンネル内への進入をポアソン過程でモデル化することにより考慮する。つまり、図-1 に示すように平均車頭時間 T に等しい時間間隔でトンネル内へ進入するモデルに対して、 Δt 秒間にトンネル内に車両が進入する確率が $p = \frac{\Delta t}{T}$ であるポアソン過程に従って車両がトンネル内へ進入すると考える。

このモデルにより、車両がトンネル内へ進入しない場合には、排出量がゼロの仮想的な車両がトンネル内へ進入するものとし、自動車全体の排出ガス量の分布をこの仮想的な車両も含めて評価する。このとき、自動車全体の排出量の平均 μ' および分散 σ'^2 は、

$$\mu' = \frac{\Delta t}{T} \cdot \mu \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\sigma'^2 = \sigma^2 \frac{\Delta t}{T} \left[1 + \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \right) \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad \dots \dots \dots (10)$$

このように仮想的な車両も含め、トンネル内への車両の進入を等時間間隔とすることにより、平均車頭時間に等しい等時間間隔で進入する場合と同様に $\sum a_i$ 、 $\sum a_i^2$ が解析的に容易に求めることが可能となる。

これより、車頭時間変動を考慮したモデルとして、モデル I の仮定 i)、ii)、iv) に対して

- i') 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 $p = \frac{\Delta t}{T}$ 、2 台以上進入することはない)
- ii') 各車両は、トンネル内を $N \cdot \Delta t$ 秒間で走行し、 Δt 秒毎に $\frac{x_i}{N}$ の排出ガスを排出
- iv') 換気により Δt 秒間に、トンネル内のガスのうち $\frac{Q \cdot \Delta t}{A}$ がトンネル外に排除される

の条件を考慮して、車頭時間変動および時間当たりの排出ガスを考慮した換気モデル (モデル II) に拡張することができる。このとき a_i は

$$a_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^i \frac{r^{k-1}}{N}; & i \leq N \\ r^{i-N} \cdot a_N; & i > N \end{cases} \quad \dots \dots \dots (11)$$

(ここで、 $r = 1 - \frac{Q \cdot \Delta T}{A}$) となり、 $\sum a_i$ 、 $\sum a_i^2$ は、次式により得られる。

$$\sum a_i = \frac{1}{A \cdot (1 - r)} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$\sum a_i^2 = \frac{N - 2r \frac{1 - r^N}{1 - r^2}}{(1 - r^2) \cdot A^2 \cdot N^2} \quad \dots \dots \dots (13)$$

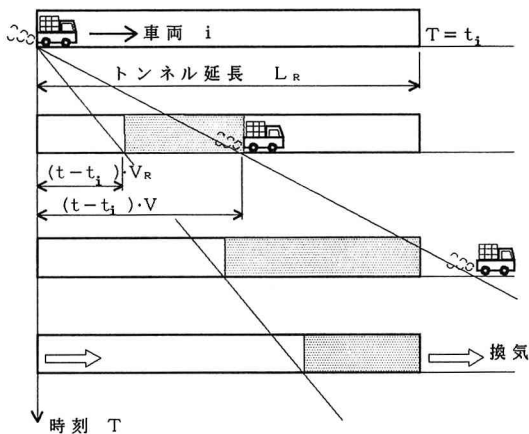


図-2 一方交通トンネルの縦流換気モデル

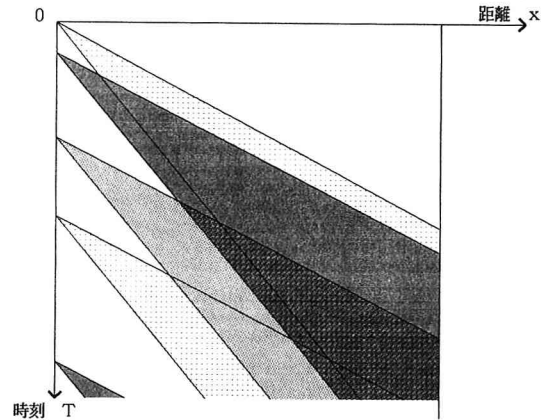


図-3 複数台の車両の濃度への影響

(3) 縦流換気を考慮したモデル (モデル III)

縦流換気の一方向交通トンネルに対し、トンネル内の空気の流れや濃度勾配によるトンネル軸方向へのガスの拡散がないものとして、モデル I の iii), iv) の条件に対し、

iii') トンネル内に進入した車両は、車両のトンネル内への進入と同時にトンネル内に引き込まれた空気の境界から、車両が走行した位置までの区間の濃度を一様に上昇させる

iv') 換気はトンネル入口からトンネル出口に向かう縦流換気を考慮する

の条件を考慮して、図-2 に示すモデルを考える。

車両の走行速度を $V(m/sec)$ 、換気風速を $V_R (= \frac{Q}{A_R})(m/sec)$ とすると、車両の濃度への寄与により、車両のトンネル内への進入と同時にトンネル内に引き込まれた空気の境界から、車両が走行した位置までの区間の濃度を一様に式 (14) の Δc だけ上昇させる。

$$\Delta c = \frac{x_i}{\left(1 - \frac{V_R}{V}\right) \cdot A} \dots \dots \dots (14)$$

複数の車両による濃度への寄与は、図-3 に示すようになる。つまり、時刻 t 、距離 x における濃度は、トンネル内の換気風速 V_R と車両の走行速度 V により決定される、その地点の濃度に寄与する進入時刻の範囲内にトンネルに進入した車両による寄与濃度を加え合わせることで得られる。

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、同時にトンネル内に引き込まれた空気の境界が 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 a_i は、

$$a_i = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_R}{V}\right) \cdot A} \dots \dots \dots (15)$$

であり、 $\sum a_i$ 、 $\sum a_i^2$ は、次式となる。

$$\sum a_i = \frac{N}{\left(1 - \frac{V_R}{V}\right) \cdot A} \dots \dots \dots (16)$$

$$\sum a_i^2 = \frac{N}{\left(1 - \frac{V_R}{V}\right)^2 \cdot A^2} \dots \dots \dots (17)$$

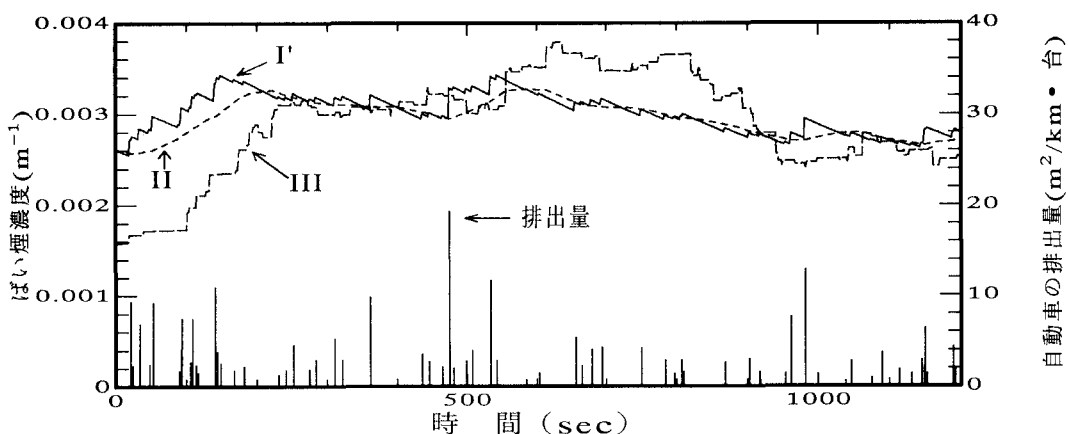


図-4 各モデルの濃度変動特性

ここで N は、 $N = \frac{l - l}{V_R \Delta t}$ で与えられ、距離 l の地点の濃度に寄与する時間内に排出量ゼロの仮想的な車両も含めトンネル内に進入する車両の総数を表す。

4. モデルの特性

モデル I ~ III について、各モデルの濃度変動特性を把握するためにシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行った。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'）。また、モデル I'、II についてはトンネル内の濃度は一様であるが、モデル III では、トンネル出口の濃度が最大となることから、トンネル出口の濃度について検討を行った。

自動車からのばい煙の排出ガス量については、ディーゼル車・ガソリン車の2車種分類で現行の技術基準³⁾の値を用いることとし、それぞれ平均値を $\mu_1 = 0.6 \times 5.6$ 、 $\mu_2 = 0.05 \times 1.3$ (m^2/km)、標準偏差はディーゼル車については $\sigma_1 = 0.5 \times 5.6$ (m^2/km) として、ガソリン車については標準偏差ゼロの一定値とした。また、ディーゼル車混入率を 20(%)、車両の走行速度は $V_R = 60(km/h)$ とした。

(1) トンネル内濃度の時間変動特性

これらのシミュレーションより得られた濃度変動を 図-4 に示す。モデル I' では、車両がトンネル内で排出する排出ガスの全量を一挙に排出した際に濃度が上昇し、その後車両が進入しない間は濃度は指数関数的に減少することから、濃度変動は「のこぎりの歯」状となっている。これに対して、時間当りの排出量を考慮したモデル II では、車両からのガスの排出が徐々になされることから濃度変動はモデル I の濃度変動を平滑化した形状となる。縦流換気を考慮したモデル III では、各車両が濃度に寄与する範囲内の濃度を一様に上昇させることから、その地点を車両が通過した時刻に濃度が上昇し、車両の進入と同時にトンネル内に引き込まれた空気がその地点を通過した時点で濃度が減少するという「凸凹」あるいは「ステップ（階段）」状の変動を示す。

(2) 所要換気量の算定

現行の技術基準においては、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、モデル I に基づき所要換気量 Q を次式により算定している³⁾。

$$Q \geq \left\{ \frac{3\sigma + \sqrt{9\sigma^2 + 8\mu K A}}{\sqrt{8TA \cdot K}} \right\}^2 \dots\dots\dots (18)$$

モデル II、III での所要換気量についてはモデル I に対する式 (18) のように簡潔な式を解析的に導くことができないことから、ここではモデル I により算定した所要換気量を換気量の第1次近似値とし、各モデルを用いて濃度の平均値および標準偏差を求め、濃度の平均 + 3 × 標準偏差の値と許容濃度との比を用いて換気量を補正して第2近似値とすることにより繰り返し計算を行い所要換気量を求めている。

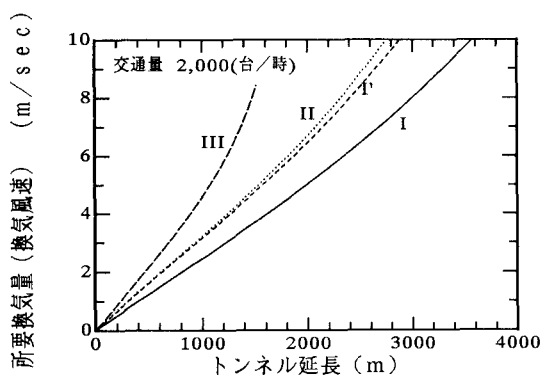


図-5 所要換気量(トンネル延長の影響)

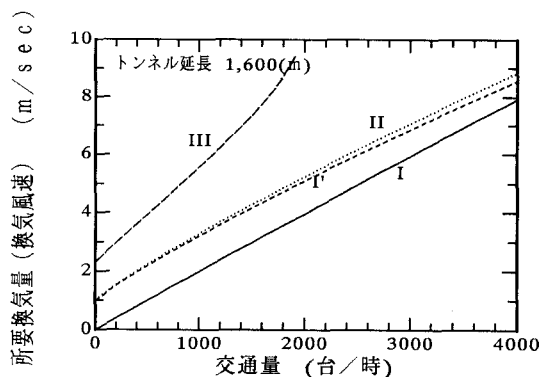


図-6 所要換気量(交通量の影響)

モデルおよびトンネル延長、交通量を変化させて所要換気量を算出した結果を図-5、図-6に示す。

車頭時間変動を考慮しない場合と考慮した場合とは、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を対象にトンネル内に進入する車両の車頭時間変動を考慮した換気モデルの構築を行った。従来より、自動車からの排出ガス量を推定する目的で一方向交通トンネル内での濃度測定が行われてきているが、これまでは主に排出ガス量の平均値の推定が行われてきている。これに対して、今回構築したモデルによれば、トンネル内の濃度の瞬時値から、その時刻の測定点の濃度に寄与する車両からの排出ガス量の総和が推定できることになり、トンネル内の濃度測定値から、自動車からの排出ガス量の車種別の平均ばかりでなく分散の推定も可能となるものと思われる⁴⁾。

トンネルの換気設計においては、各換気方式による濃度変動特性を適切に表現できる換気モデルが必要であるばかりでなく、自動車からの排出ガス量の分布を的確に把握する必要がある。また、他の換気方式のトンネルに対する換気モデルを構築する上でも自動車からの排出ガス量の把握は重要である。

自動車排出ガス規制の強化や地球環境問題・エネルギー問題などの影響による自動車の使用燃料の変化等の影響により、自動車の排出ガス特性は今後も大きく変動することが予想される。今後、実測値との照合によりモデルの検証を行うとともに、本モデルを用いた自動車からの排出ガス量の推定に関して検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 定塚正行・鈴木幾雄: 道路トンネルの換気と防災, 道路 1990-2, pp.38-43, 1990.
- 2) 伊吹山四郎・今田 徹: 道路トンネルの換気に関する研究, 土木研究所報告 第157号, 1982.
- 3) (社)日本道路協会: 道路トンネル技術基準(換気編)・同解説, 1985.
- 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.