

集中排気式の一方向交通トンネルにおける 排出ガス濃度の時間変動

LONGITUDINAL VENTILATION MODEL FOR
ONE-WAY TRAFFIC TUNNEL OF CONCENTRATED EXHAUST TYPE

箕作 幸治*・武山 泰**

By Kouji MITSUKURI and Yasushi TAKEYAMA

In this paper, the longitudinal ventilation model for one-way traffic tunnel of concentrated exhaust type is described. The characteristics of concentration of vehicular emissions in tunnel of this ventilation system are examined using both simulation model and mathematical model. The mean and standard deviation of concentration in tunnel can be calculated using the present mathematical model, and sufficient ventilation air flow volume for acceptable conditions are also evaluated through this model.

Key Words : tunnel ventilation, simulation

1. はじめに

近年、トンネル掘削技術の進展や高速道路網の整備に伴って、建設されるトンネルの件数が増加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。延長の短いトンネルでは、走行車両によって引き起こされる交通風のみを利用した自然換気だけで十分な場合もあるが、延長の長いトンネルや交通量の多いトンネルでは換気が重要な問題となり、機械換気施設が必要となってくる。そこで本研究では、仙台西道路青葉山トンネル上り線を対象に、換気に関して最も問題となる朝のラッシュ時におけるトンネル内排出ガス濃度の時間変動について検討を行った。なお、換気量はばい煙に対して必要とされる量が圧倒的に大きいので、排出ガス中の有害成分のうちばい煙についてのみ考えることにする。

2. 立坑集中排気縦流換気方式の換気モデル

図-1のように換気施設を運転していない状態では、通常自然換気の縦流換気トンネルと同様に、トンネル内の風向は自動車の進行方向と同じで、排出ガスの濃度分布は入口から出口に向かって一定の傾きで上昇することになる。

図-2は、換気施設を運転している状態で、換気施設より出口側の部分においてトンネル内の風向が自動車の進行方向と反対になることによって、排出ガスの濃度分布は換気口がある地点に向かって入口あるいは出口からほぼ一定の傾きで上昇することになる。

本研究では、簡単な換気モデルを用いることによって、図-1の自然換気状態から換気施設の運転を開始し、図-2の換気運転時の定常状態に至る間の非定常状態における排出ガス濃度の時間変動をシミュレーションにより算出した。

* 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)

** 工博 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)

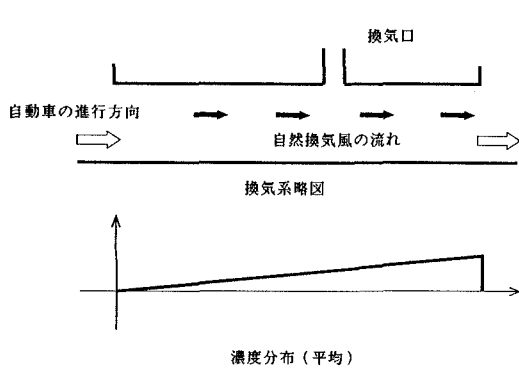


図-1 自然換気

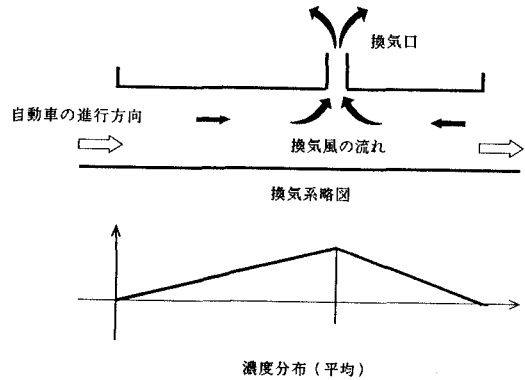


図-2 集中排気式

3. シミュレーションの基本的考え方

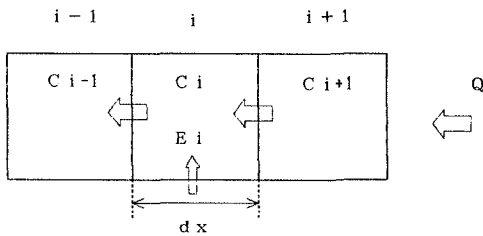


図-3 換気モデル

まず、トンネル全体を 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。車からの排出量および換気風による各微小区間毎の排出ガスの収支計算を 1 秒毎に行う。トンネル内に進入する自動車は対応する時間の交通量、大型車混入率をもとに乱数を用い車頭間隔時間を与えた。この際、乱数の中でも自動車の発生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]）¹⁾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。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。この時、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。（図-3 参照）

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

ここで、 C_{i+1} ：区間 $i+1$ におけるばい煙濃度 [1/m]， Q ：換気風量 [m³/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。

$$C_{i+1} \cdot Q + E_i - C_i \cdot Q = dc \cdot A_R \cdot dx \cdots \cdots (2)$$

ここで、 A_R ：トンネル断面積 [m²]， dx ：トンネル内の微小区間延長 [m]， dc ：区間 i での濃度変化。

本研究では、交通風の影響および軸方向の拡散を考慮していないので、以上のような簡単な式で表される。図-3 は、換気口より出口側の区間を表しているので、換気風およびばい煙は出口側から換気口へ流れることになる。換気口より入口側の区間ではこれと反対の向きとなる。

このモデルでは、次のような手順で計算を進めていく。 $T=0$ に自動車が 1 台トンネルに進入した後、1 秒以上あけてから次の車を進入させる。各トンネル微小区間に存在する自動車とその区間内を走行する間にどれだけの量のばい煙を排出するかを検討し、各区間境界におけるばい煙の混合と、区間内でのばい煙濃度の上昇にともなうばい煙の収支を考慮することにより各区間毎の濃度を計算していく。そして、 $T=T+1$ に移る。

以上のように、1 秒以上の間隔をあけさせながら、次々と大型車を含め自動車を発生させ、トンネル内の各区間でのばい煙濃度を計算する。

4. 排出ガス濃度分布の時間変動

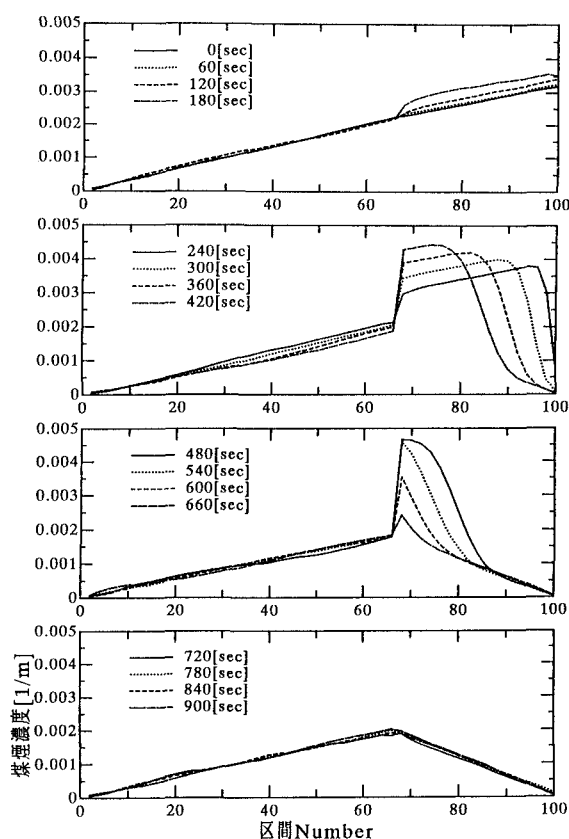


図-4 トンネル微小区間毎の排出ガス濃度分布

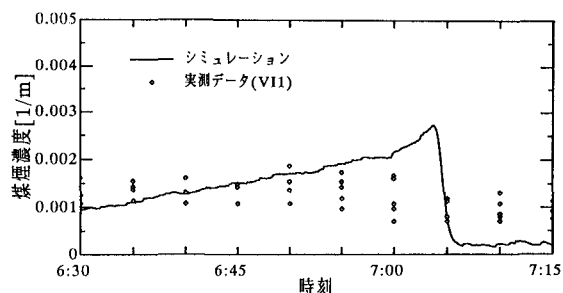


図-5 実測値との比較

自然換気から機械換気に移行した直後においては、換気施設より出口側の区間でトンネル内風速が逆転することによって空気の混合が生じ、排出ガス濃度が一時的に急上昇することになる。特に朝のラッシュ時ではその影響が大きい。研究対象としている仙台西道路青葉山トンネル上り線の実測調査により得られたデータのうち、実際に自然換気から機械換気に切り替わる時点（平日では午前7:00）の前後の時間帯について、5分間の全交通量、大型車交通量（大型車混入率）、トンネル内風速について平均的な値を交通条件、換気条件として用いた。そしてシミュレーションを行い、換気開始から900秒間にわたって60秒毎にデータを取り、排出ガス濃度の時間変動を求めた。図-4に、その結果を示す。区間番号0が入口、100が出口、そして66が排気口のある場所に相当する。0 [sec] すなわち換気開始までの濃度分布は、図-1のようにほぼ定常的な状態である。換気開始後は、出口側から換気施設がある区間までばい煙が逆流することにより、ばい煙濃度が押し上げられ一時的に高濃度となる。しかし、その部分が換気された後は、濃度は下降し図-2のようなほぼ定常的な状態になる。

次に、透過率計の実測値から求められるばい煙濃度との比較を行った。図-4のシミュレーションのうち、ばい煙濃度測定区間に対応した微小区間での平均値と、5日間の測定において透過率の測定値から求めたばい煙濃度の値（V11）を図-5に示す。実測データでは、シミュレーションで得られた値のような換気開始直後の濃度の上昇という現象はみられない。

5. 数学的モデルとの比較

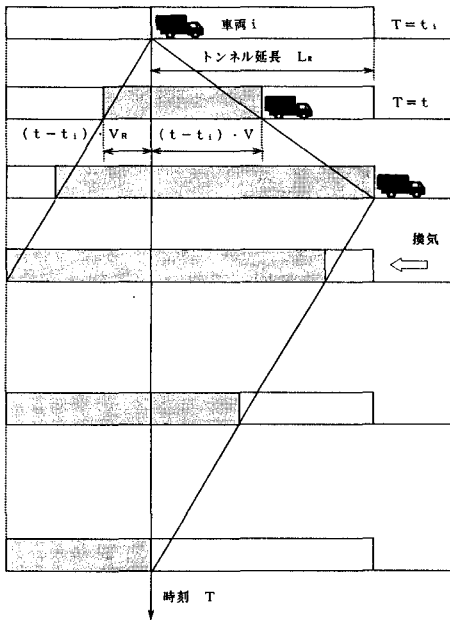


図-6 集中排気式トンネルの換気モデル

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流れを考慮した換気モデル²⁾が構築されている。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し、つぎに一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っている。このモデルによれば、トンネル内濃度の瞬時値から、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る。図-6にその概念図を示す。

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合わせることで次式で表される。

$$c = \sum a_i \cdot x_i \dots\dots\dots (3)$$

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。

$$\mu_c = \sum a_i \cdot x_i = \mu \cdot \sum a_i \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_c^2 = \sum (a_i \cdot \sigma_i)^2 = \sigma^2 \cdot \sum (a_i)^2 \dots\dots\dots (5)$$

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 は次式で表される。

$$\mu' = \frac{\Delta t}{T} \cdot \mu \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma'^2 = \sigma^2 \frac{\Delta t}{T} \cdot \left\{ 1 + \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \right) \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

縦流換気の一方交通トンネルに対し、軸方向の空気の流れやガスの拡散がないものとして、図-6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_{aff} は車両のトンネル内への進入と同時にトンネル内から排気された空気の境界から、車両が走行した位置までの区間に対して等しく、

$$c_{aff} = \frac{x_i}{\left(1 + \frac{V}{V_R} \right) \cdot A} \dots\dots\dots (8)$$

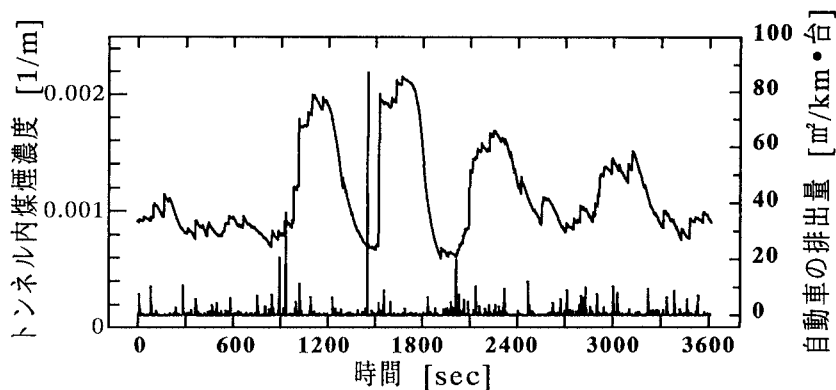


図-7 トンネル内濃度の時間変動

表-1 平均値と分散の比較

	数学的モデル	シミュレーション
平均値	1.048×10^{-8}	1.139×10^{-8}
分散	4.039×10^{-4}	3.966×10^{-4}

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 ($(t - t_i) \cdot V_R < l$)、かつ、トンネル内から出るのと同時刻にトンネル内に吸い込まれた空気の境界が l を通過していない ($L - \{t - (t_i + L/V)\} \cdot V_R > l$) 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。

$$\sum a_i = \frac{N}{\left(1 + \frac{V_R}{V}\right) \cdot A} \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum a_i^2 = \frac{N}{\left(1 + \frac{V_R}{V}\right)^2 \cdot A^2} \dots\dots\dots (10)$$

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

そこで、トンネル内濃度の平均値と分散についてこの数学的モデルに基づく計算値と、シミュレーションモデルから得られた値の比較を行った。図-7、表-1 にその結果を示す。入力条件は両者を統一させた。

6. ばい煙に対する換気量の算定式

ばい煙に対する換気の設計濃度は、トンネル内において自動車の走行速度に応じて必要な視距が得られることを目標に定められている。

一方、自動車からのばい煙の排出量はエンジンの種類、形式、排出ガス規制値などの各種の要因によって異なる。したがって、トンネルの換気設計では従来から自動車が排出するばい煙の量を単なる平均値として取り扱うのではなく、それぞれの自動車からのばい煙排出量の分散を考慮した手法を用いて換気量を算定することとしてきている。

現行の技術基準³⁾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、所要換気量 Q を次式により算定している。

$$Q \geq \left\{ \frac{3\sigma + \sqrt{(9\sigma^2 + 8\mu KA)}}{\sqrt{8TA \cdot K}} \right\}^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 K ：換気的设计濃度、 T ：自動車群の平均車頭時間。

本研究で導いた数学的モデルでの所要換気量については式(11)のように簡潔な式を解析的に導くことができない。したがって、式(4)～(10)により濃度の平均値と標準偏差を求め、濃度の平均に標準偏差の3倍を加えた値がばい煙濃度(100m 当たり透過率) 50% 以上となるような所要換気量を繰り返し計算により求めた。

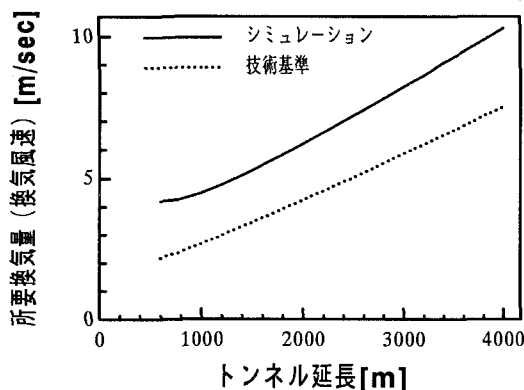


図-8 トンネル延長と所要換気量

ばい煙の排出係数およびトンネル延長を変化させて所要換気量を算出した結果を図-8に示す。

排出係数は、本研究のシミュレーションで用いた値と現行の技術基準の値を用いることとした。技術基準の値についてはディーゼル車(大型車)・ガソリン車(小型車)の2車種分類で、それぞれ平均値を $\mu_1 = 0.6 \times 5.6$, $\mu_2 = 0.05 \times 1.3$ [m²/km], ディーゼル車については標準偏差を $\sigma_1 = 0.5 \times 5.6$ [m²/km] とし、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15%、車両の走行速度は $V_R = 60$ [km/h] とし、両者の排出係数以外の条件を統一させた。

7. まとめ

本研究ではシミュレーションモデルを用い、集中排気式の一方向交通トンネルでの非定常状態におけるばい煙濃度分布の変動を評価した。また、同じ換気モデルに関する数学的モデルを導き、シミュレーションモデルとの比較を行い、数学的モデルに基づいて所要換気量の算定を行った。

本研究の換気モデルにおいてはトンネル内の軸方向についての拡散については考慮にいれておらず、換気モデルのより詳細な検討のためには、トンネル延長方向のばい煙濃度分布を高精度で測定できる新たな測定技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 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回日本道路学会一般論文集，pp.294-295，1991。
- 2) 武山 泰・福田 正：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，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第1巻，pp.311-316，1991。
- 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。