

道路トンネル内の拡散について

光 田 寧

TURBULENT DIFFUSION IN THE ROAD TUNNEL

By Yasushi MITSUTA

Synopsis

Diffusion in the road tunnel of two way traffic is studied. Even on the calm condition the air in the tunnel is quite turbulent owing to the car traffic in the tunnel. The traffic diffusion coefficient is estimated from the analogy of the molecular motion of gas. The distribution and intensity of pollution in the tunnel from noxious gas is estimated. And an example of the result of pollution experiment in a real tunnel is explained.

1. は し が き

道路トンネル内において自動車の排出した有害物質がトンネル内に残留し、色々な障害を発生させることが大きな問題となっている。強制換気が行なわれている場合や一般的に風が吹くなどして坑口間に気圧差が生じトンネル内に平均的な流れのある場合については研究が比較的行なわれているが¹⁾、強制換気が行なわれているトンネルは数も少なく、大多数のトンネルは自然換気にたよっており、自然換気にたよる以上坑口間の気圧差がなくなりトンネル内に平均的な流れの止る時間が生じることが避けられず障害発生等実際上問題となることが多い。このような場合、トンネル内で排出された物質は流れによって輸送されることはなく、拡散のみによって坑口から排出されるのでトンネル内の濃度は非常に大きくなる。道路トンネルの場合、それが一方通行の場合には交通に伴って流れが生じるのでトンネル内の空気の流れが止る可能性は小さい。しかし、対面通行のトンネルではそのようなことがないので平均流が零となる可能性が大きい。このような点から問題が多いと思われる対面交通の道路トンネル内での拡散について検討して見た結果が本報である。

2. トンネル内の拡散

いま、平均的な流れのない場合、トンネルの一方の坑口から x の距離にある点での汚染質の濃度を E 、単位長当りの汚染質の発生率を G とすると、トンネル内の濃度変化は次のような関係で示される。

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{d}{dx} \left(K \frac{dE}{dx} \right) + G \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで K は拡散係数である。

問題となるのは濃度がどこまで高くなるかということであり、状態が定常に達した時の様子を知らればよい。またトンネルの両端では外気と自由に交流するからそこでの濃度は外気と同じになるはずであり、理想化された状態では零と考えて良い。そして、トンネル内の拡散係数は場所によって変わらないと考えても良いから、次のような条件で (1) 式を解けばよいことになる。

$$\frac{dE}{dt} = 0, E=0 \text{ at } x=0 \text{ and } L, K=\text{const.} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで L はトンネルの長さである。そうするとこの式の解は次のようになる。

$$E = \frac{G}{2K} (L-x)x \quad \dots\dots\dots (3)$$

従って単位長当りの汚染質の発生率, G と拡散係数, K が解ればトンネル内の汚染質の濃度分布が求められることになる。また, トンネル中央での最大濃度は次のようになる。

$$E_{\max} = \frac{1}{8} \frac{GL^2}{K} \dots\dots\dots (4)$$

この式を応用する上での問題は拡散係数をどのように取るかということにある。

3. トンネル内の空気の乱れ

トンネル内の空気が完全に静止しているならば, 拡散は分子拡散によるものしか考えられないが, 実際にはトンネル内を通過する自動車があるためトンネル内の空気はかなりはげしく動いている。トンネル内の汚染を調べる目的で神戸市内鉄拐山トンネルにおいて行なった観測の際得られた記録の例が Fig. 1 および Fig. 2 示にしてある。この観測ではトンネル中央付近の天井にトンネル平行方向の風速成分を観測する風

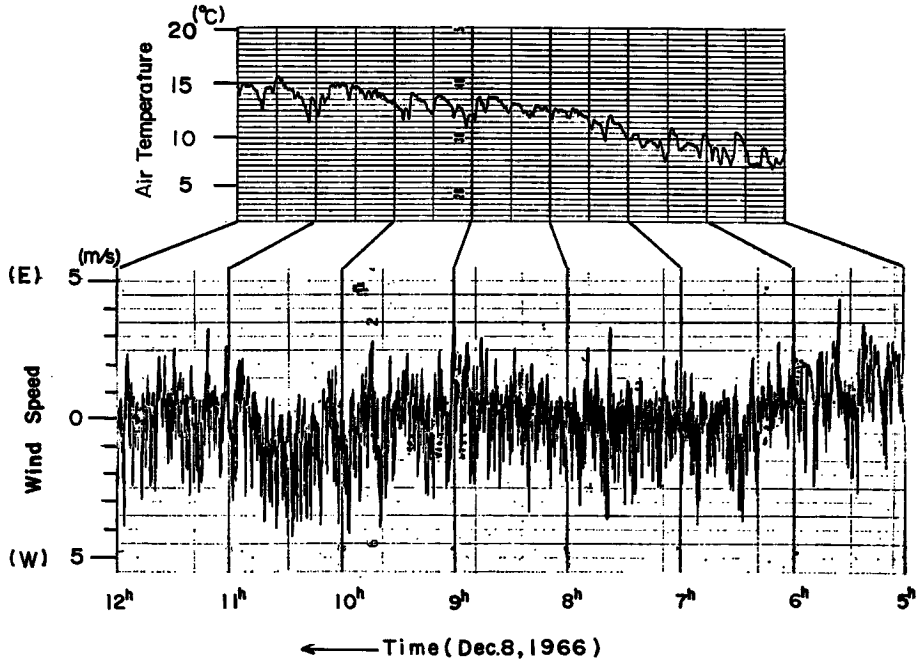


Fig. 1 An example of wind and temperature changes in the tunnel on a calm day.

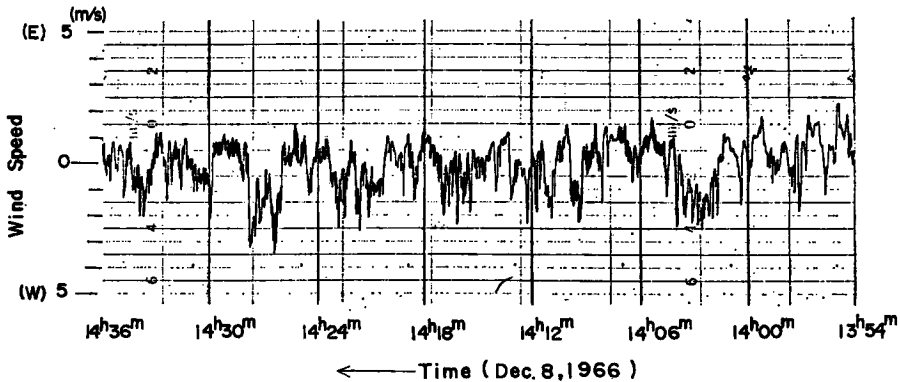


Fig. 2 An example of detail structure of wind fluctuations in the tunnel.

速計と温度計を取り付け連続記録を取った。Fig. 1 は平均風速がほとんど無かった日の午前中の記録の例で、平均的に流れはなくても風速の変動ははげしく、その振巾は 5 m/sec ぐらいにも達しているのが良く見られる。そして温度の記録の上でも変動のはげしいのが見られる。風速の変動をさらに詳しく見るために記録紙を早送りにして記録を取った例が Fig. 2 であるが、風速の変化は非常に急激で、それが自動車の通過と密接に関係しているらしいことが良く解る。

結局、トンネル内の空気は自動車の通過に伴って、その方向に引きずられて動くが、つぎに反対方向から自動車がやって来ると今度は逆の方向に流れるというようなことを繰り返しているものと考えられる。このような現象はトンネル内の平均的な流れに対しては抵抗として作用しているが、同時に空気の交換を生ぜしめ拡散作用の原因となっていると見て良い。すなわち、トンネル内ではこのような自動車の通行によって生じる乱れがあって、一般の大気とは全く異なった様相を示しており、拡散係数を評価するにしてもこのような現象をはっきりととらえねばならない。ここではこのような現象による拡散を仮りに交通拡散と呼ぶことにする。

4. 交通拡散

トンネル内の空気が自動車の通過に伴って前後に移動している様子は気体中の分子の運動に類似していると考えることが出来る。すなわち始めにある向きの自動車の動きで引きずられて動き始めた空気は次に反対方向の自動車の擦れ違いと共に反対方向に流れ始め、また次の擦れ違いで流れの向きを替えることになる。分子運動における運動速度は自動車の速度に対応し、平均自由行程は自動車の出会い距離によって示される。分子拡散の類推から拡散係数は運動速度と平均自由行程との積に比例するのに対応して、交通拡散係数 (K_T) もまた次のように書くことが出来るであろう。(Fig. 3 参照)

$$K_T = kS(S/N) \dots \dots \dots (5)$$

ここで k は比例常数であり、 S は自動車の平均速度、 N は単位時間当りの自動車の交通量(両方向の和)を示す。もっとも自動車の交通量はどの方向にもほぼ平等に配分されているとしている。

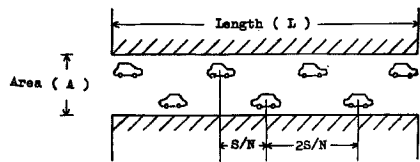


Fig. 3 Schematic diagram of car traffic in the tunnel.

5. トンネル内の濃度分布

汚染質の発生率は自動車の種類、走行速度などによって変化する量であることは当然であるが、極端な速度の差を考えなければ、単位時間について一定量の汚染質を排出すると見ても良いであろう。その平均値を e とするとトンネル内の単位長当りの汚染質発生率、 G は次のように書ける

$$G = \frac{eN}{SA} \dots \dots \dots (6)$$

ここで A はトンネルの断面積である。このようにして求められた拡散係数 (5 式) と発生率 (6 式) を用いると濃度分布を示す (3) 式は次のように書ける

$$E = \frac{eN^2}{2kS^3A}(L-x)x \dots \dots \dots (7)$$

また最大濃度を示す (4) 式は

$$E_{max} = \frac{eL^2 N^2}{8kS^3A} \dots \dots \dots (8)$$

と書けることになる。これによって各係数の大きさが決定されればトンネル内の汚染質の濃度分布が求められることになる。

しかし、ここで比例常数 k だけは何らかの実験によって決定する他ない。もっともこの常数が決定されなくても、現在の交通量と濃度から将来交通量が増加した時の濃度を推定するのにこの関係式を利用することが出来る。

6. 実 例

先に示した長さ660mの神戸市の鉄拐山トンネルにおいて1966年11月8日に汚染質の調査が行なわれたが、トンネル内の平均風速が零に近かった当日の午前11時頃にトンネル中央付近で得られた一酸化炭素(CO)の濃度は0.015%であった。この時に実測された交通量は1400 cars/hrそして平均走行速度は40 km/hrであった。

いま、トンネル内のCO濃度の許容限界を0.025%とするならば、このトンネルの場合、いまのままの平均速度が維持出来たととしても、交通量が約2000 cars/hrになると限界に達することがここで得られた関係式(8式)を用いて推算される。もっとも、最大濃度は走行速度の3乗に逆比例するから、平均走行速度が少しでも落ちると濃度は増加し、このトンネルの場合何らかの原因で速度が20%減じ32 km/hrになると濃度は上昇して、この日と同じ1400 cars/hrという交通量のままでも、許容限界を越えることになる。

このトンネルの内部はコンクリートの巻き立てが完全に行なわれておらず、岩肌が出ているところもあって断面積を正確に定め難いが、推定平均断面積を40 m²とし、さらに自動車の平均CO排出量は関門トンネルで行なわれた実測の平均値として報告されている1.2 m³/cars・hr¹⁾と等しいものと仮定すると、(8)式から比例係数 k を計算することが出来る。この例の場合から求めた値は0.33 (cars)となる。

この係数の値を用いてこの場合の交通拡散係数、 K_T を計算してみると、(5)式から $K_T=106 \text{ m}^2/\text{sec}$ という値が得られる。これは空気中での気体の分子拡散係数から期待される値に比べると桁違いに大きな値である。すなわち、通行している自動車自身が拡散にはたしている役割は非常に大きいものであり、トンネル内での汚染質の濃度分布の算定には決定的な意味を持つことを示している。しかも、この拡散係数は(5)式に示すとうり交通量および走行速度の関数である。

7. 結 語

対面通行道路トンネル内での汚染質の拡散について検討して見た結果、自動車の通行に伴って生じる空気の乱れが拡散に大きな役割をはたしていることが明らかとなった。分子運動との類推から求めた交通拡散係数は(5)式によって示されるような形となる。トンネル内に平均的な流れの無い場合の最大濃度は(8)式で求められるとおりで、交通量の2乗とトンネル長の2乗の積に比例し、自動車の走行速度の3乗とトンネル面積の積に反比例することになる。

神戸市鉄拐山トンネル内で実測した交通量、走行速度および一酸化炭素汚染濃度の値に基づいて(5)式の係数 k を求めると0.33 (cars)という値が得られた。この時の交通拡散係数は106 m²/secであり分子拡散係数から期待される値よりずっと大きい。

ここで求められた関係式および係数は他のトンネルでの汚染の状態を予想するためにそのまま用いることが出来る。従って許容交通量や強制換気を始めねばならない限界を求めることがこれによって可能となった。

参 考 文 献

- 1) 伊吹山四郎：道路トンネルの換気，理工図書，昭42，p. 140.