道路トンネルおよび道路構造物 まわりの流れ*

田 辺 宏 雄**

Flow Around the Road Tunnel and Road Structures

Hiroo TANABE

かつて、道路トンネルの換気は利用者の安全と快適さを念頭において、有害ガスやディーゼル黒煙を安全限界まで希釈できるよう計画すれば事足りていた。最近では環境影響評価制度に関連して道路全般に亘って大気汚染予測などの対応が必要となっている。すなわち、トンネル換気などの車道内環境から大気汚染—生活環境へと検討範囲が拡大している。

環境影響評価の実施に際しては多くの情報を必要とする。道路の交通に係る大気汚染についてみると、走行する自動車から排出される汚染質が環境中に拡散してゆく際にトンネルや道路構造物がその中でどう係り、どのような現象をおこしているかを調べるために可視化技術の応用対象が広いと考えられる。また、このような中で実現現象についての情報が蓄積される意義は大きいといえる。

実現現象の記録は困難な条件が多く事例に乏しく、対象に偏りがあるがその中のいくつかを紹介する。

1. 道路に関する実現現象の可視化

道路の交通にともなつて生ずるさまざまな現象は、車道空間に走行する自動車が存在してはじめて実現現象とみることができる。

道路トンネルの場合、車道空間内では、走行する自動車によってトンネル坑内の空気はかくはんされ、汚染物質の濃度はトンネル内で均一化する

方向へ変化する。この走行する自動車のかくはん作用は、主に自動車背後の後流による物質の輸送と後流の強い乱れによる物質の混合によって生じており、その効果は時間的・空間的に間欠的なものである。しかし継続的にかく乱が与えられているトンネル内の汚染物質移動を巨視的・時間平均的に見るならば、トンネル内は軸方向濃度こう配によって駆動される一次元乱流拡散場とみることができる¹⁾。

一方、ポータル周辺にはトンネル内の汚染空気が流出し、環境上の課題が生ずる場合がある。このため、ポータルから流出する汚染質の量を制御する方法として、トンネル換気方式の選択²⁾、坑口排気と呼ばれる排気ファンの設置がある。しかし、トンネル内で発生する自動車排出ガスのポータルからの流出をゼロとすることはできない³⁾。

また、ポータルから排出される汚染空気のジェット状の流れは周辺への拡散性状に影響を与える。この流れは走行風またはピストン作用と呼ばれるもので、自動車の走行に大きく依存している。図1にポータルからの汚染空気の流出の状態(水槽実験)を示す。

トンネル以外の道路でも大なり小なり走行する自動車の存在がかかわっている現象が多い。

以上のように実現現象について車輛火災や換気塔からの排気を除くと実現現象としてみるためには走行する自動車の存在が無視できない。このことから、実現現象を可視化する方法として視程障害の生じる煙の使用は走行安全上採用できない。

*原稿受付 昭和60年7月10日

**首都高速道路公団

図1 一方通行トンネルポータル部からの汚染空気の流出(水槽実験) 模型縮率 1/139, 走行車速度 2.86 m/s, トンネル代表径45.5 mm, 交通量 2,000 veh/h 相当, トンネル出口直前よりトレーサのインク注入, 立坑にて車道内流量の74%の排気を行っている状態

正常走行の交通の場合, 自動車排出ガスによっては流れの状態を可視化することはむずかしい。このため実現象の可視化は整備不良車に起因する煙やディーゼル黒煙の多い場合を光線などの条件を含め根気よく待ち, フィルムに記録するなど偶然の機会を待つ必要がある。

しかし, このような場合でも煙の濃度は低く, 煙の色などの関係で目視で観察できてもフィルムへの記録は困難な場合が多い。

今後の課題としては, 視程障害を生じさせないトレーサと記録方法, また, ディーゼル黒煙など走行する自動車から排出されるものを利用し, 鮮明な記録が得られる手法の検討が必要となる。

2. 火災時の煙の挙動

道路トンネルの換気, 安全対策を検討する際に欠かすことができないものに車輛火災がある。火災の場合煙への対応が大きな課題である。このため車道内における火災時の煙の挙動を把握し, 換気やその運用方法の検討が必要となる。

トンネルの火災実験は車道内を汚さないためアルコール火皿と発煙筒の併用で行なう場合が多い。また, そのような制約がない場合はガソリン火皿が普通用いられる。実際に自動車を燃焼させることは少ないが図2に未供用のトンネル内で使用しなくなった路線バスを用いた火災実験の事例を示す。

発火後約2分経過の状態である。車道内は風の

表1 実現象の可視化の条件

流れ場としての区分		可視化のための煙の使用可否	流れの場としての自動車走行との関連	記 事
トンネル部	車道空間(換気)	不可	大	火災実験時の煙がトレーサとなる 事前に関係機関への連絡が必要
	車道空間(火災時の煙流)	可	—	
	ポータル部からの排気(大気拡散)	不可	大	
	換気塔からの排気(大気拡散)	可	無	
平地・明り部	車道空間	不可	大	
明り部・高架	道路構造物まわり 自動車排出ガスの拡散空間(大気拡散)	要注意 要注意	大/小 小	

流れを抑制し, 煙に攪乱を与えなければ相当の時間一定の区間では煙が上層に集まり, 下層がクリアな二層構造が維持されることを示している。

このクリアな空間は火災発生時における避難の際の重要な空間である。

3. 換気塔からの排気拡散

換気塔から排出される汚染空気は換気ファンが

図2 トンネル内車輛火災時の煙の挙動
トンネル断面積 56.6 m², 最大幅 10.2 m,
バス車体幅 2.5 m

(a) 実現象における排気上の上昇 $V_g/U=3.6$
 $U=2.5 \text{ m/s}$, 塔高 49 m, 排出口の径 7.2 m

(b) 模型実験 $V_g/U=4.0$

(c) 模型実験 $V_g/U=2.9$

図3 実現象と模型実験の比較。(b), (c)は図4参照。

あることにより一定の排出速度をもっている。また、排出される汚染空気と大気との温度差は、たかだか数度と非常に少ない。すなわち、浮力をもたない排出速度のみをもった排気である。

汚染空気の拡散効果が高い排出方法と考えられるものに煙突などと同じ型式の上向き吹出しがある。この場合、大気中に排出された汚染空気は、モーメントにより上昇しながら拡散過程に移行する。予測計算では通常排気の上昇と拡散過程を分けてモデル化している。

この排気の上昇について、排出速度のみの場合

に示されている計算式をみると次式のように整理される⁴⁾。

$$H_m/D = f(V_g/U)$$

ここで H_m : 排気の上昇高さ

D : 排出口の径

V_g : 排気の排出速度

U : 横風の風速

このように排気の上昇高さは排出速度 V_g と風速 U の比 V_g/U で決まってくるものと考えられる。

一方、風速が大きくなると、排気が吹倒され、風によって生じた換気塔背面の負圧域またはうず

域に排気が巻き込まれて下降するダウンウオッシュ、またはダウンドラフトが生ずる。市街地などでは他の建築物などとの関係でダウンドラフトが生ずることも予想される。また、換気塔にはトンネル内に送気するための外気取入口を設ける場合もあり排出口とのショートサーキットを避けなければならない。

トンネル換気塔からの排気は毎秒数百立方メートルと大風量である。排気中に含まれるディーゼル黒煙などは安全限界迄希釈されているため濃度は低く通常目で見えることは困難

図4 風速と風向の違いによる排気上昇の変化(風洞実験)
 模型縮率 1/500, $V_g=10 \text{ m/s}$ (一定),
 塔高 98 mm, 排出口の径 12.7 mm ト
 レーサは流動パラフィン, 露出時間 8 s

である。このため実現象を可視化するには発煙筒の煙などを用いなければならない。図3(a)の場合は夜間の可視化であるが市販の白色煙の発煙筒9本を同時使用(発煙薬剂量は排気量 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 当り約 0.01 kg)し、約5分間の観測時間が得られた。市街地など夜間外光がある地域では撮影の際比較的長い露光時間をとることができる。一方、日中排気を濃い色に着色するためには排気量 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 当り 0.2 kg 程度の発煙薬剂量を必要とし、5~10分間程度の観測が可能とされている⁵⁾。なお、夜間では大気安定度の面からみると、昼間にしか出現しない不安定の状態を見ることができない。

(a) 排気の上昇状態(風は左から右に向かって吹く)
排気の左半分は風上側に向かって上昇をはじめますが、風により方向が変えられている。右半分は斜上方に上昇する

(b) 排出口雨仕舞ルーバ(上記排出口)

図5 排出口の構造と排気の上昇状態

排気の上昇について、実現象と模型実験の結果を比較したものが図3である。まず写真上で排出口の径をあわせ、 V_g/U の値にしたがって上昇高さを較べてみたものである。模型実験がほぼ実現象を再現していることを示している。

換気塔の排出口の大きさは塔本体にくらべ小さいことが多い。また塔の形状もいろいろに選定されるため、風向により排気の上昇やダウンウォッシュもしくはダウンドラフト現象の影響がどう係るかを目的として風洞による模型実験で調べたものが図4である。 V_g/U の値が2.5位から影響が出はじめていることがわかる。

排気のパイプの排出方向が上向きでも排出口に雨仕舞のルーバなどが設置されていると排気流は斜上方に上昇することがある。この状況を図5に示す。

道路トンネルの場合非常に珍しい事例であるが、冬季排気中の水分が凝縮して生じた白煙が見られたものである。 V_g はあまり大きくないがほとんど無風状態の大気中にまっすぐ上昇している状況を図6に示す。冬季の低い太陽高度と半逆光により比較的鮮明に記録できた例である。

以上のように排気の上昇過程やダウンウォッシュ、ダウンドラフト現象など換気塔周辺での現象

図6 道路トンネルでは珍しい水分の凝縮による白煙から実現象が可視化された例
排出口直径 6.2 m ,
排出速度 数 m/s (撮影時、運転状況により変化する)

を調べるために、模型、実現象とも可視化技術が非常に効果的であると考えられる。

4. 高架構造物まわりの流れ

環境影響評価において道路の交通による大気汚染の予測は、拡散モデルによる計算式、模型実験、野外拡散実験、類似事例のうちから適切なものの選択、またはその組合せの方法によって行なわれる⁷⁾。このようなことから道路構造物まわりの流れは自動車排出ガスの拡散予測をする際の重要な情報のひとつである。

図7は都市内高速道路のごく標準的な型式の高架道路の高欄とよばれる側壁部のかどに生じるはく離流を記録した例である。

この事例は、舗装切削の試験を行っている時、偶然観察されたものである。舗装切削はアスファルト舗装の表層を更新する際、古い表層をプレートヒータなどと呼ばれる加熱装置で軟化させ、カッターで削り取るものである。この際、アスファルトが加熱され白煙が生じ、流れが可視化されたものである。

写真の場所は、都心部であるが中低層建物の連たん地である。地表面から高架道路の路面迄の高さは約9m。高欄とよばれるコンクリート壁は、路面から90cmの高さがあり、厚さは15cmである。風速などは現地で測定していないので、正確には知り得ないが気象台の観測値は12.5m/sと強風であった。また、風向は高架道路にはほぼ直

図7 高架構造道路の高欄の角に生じたはく離

交の南風である。

加熱されて生じたアスファルトの白煙は、高欄の風下側を、風とは逆に輸送され、風上側の高欄を上昇する。その後はく離面より下を風下側に輸送されてゆく状況が鮮明に観察された。また、このような構造の道路で2~3m/sの風速でもはく離面の形状に多少の違いがあるものの、ほぼ同様の現象が生じていることを確認している。

5. おわりに

実現象を可視化等の手法で把握する意義は

1) 模型実験、計算法等の計画、解析の際の基礎資料。

2) 模型実験、計算で得られた結果の検証。

3) 視覚による説明材料としての活用。

が考えられる。特に3)項は環境影響評価制度のなかで物事を理解してもらう上で重要なものといえよう。

道路トンネルや構造物まわりで自動車の走行が関係する流れの実現象の可視化は、当面、整備不良車の煙などを根気よくつかまえてフィルムに記録するなど、偶然の機会を辛抱強く待つ以外ないようである。今後、実現象の流れの可視化を安全で経済的に実施できる手法の開発が望まれる。

最後に、本稿をまとめるに当りご指導いただいた大橋秀雄東京大学教授に謝意を表します。

文 献

- 1) 大橋ほか4名：自動車トンネルにおける排気ガス拡散，日本機械学会論文集，Vol. 48，No. 436，(昭57-12) 2493
- 2) 大橋，坑口の環境問題からみたトンネル換気，高速道路と自動車，Vol. XVIII，No. 8 (1975) 32
- 3) Sato N. et al, Discharge of exhaust pollutant from portal of one-way traffic automobil tunnel with exhaust shaft, 5th international symposium on the aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels (1985)
- 4) Perkins, H. C., Air pollution (1974), 204 Mc Graw-Hill
- 5) 四方，流れの可視化でわかるか (7. 環境) 流れの可視化，1-3，(昭56) 241
- 6) 釜口，大気・海洋中の拡散模型実験，流れの可視化，3-8 (1983-1) 24
- 7) 東京都環境保全局編，環境影響評価制度の手引，(昭58-3) 45