

トンネル坑口拡散の模型実験法に関する研究

井手 靖雄*¹・垣谷 智弘*²・吉岡 英樹*³・大城 忠治*⁴

Study on Model Experiment Method of the Tunnel Outlet Pollution

Yasuo IDE, Tomohiro KAKITANI, Hideki YOSHIOKA
and Tadaharu OOKI

Abstract

At road construction planning, the road environmental assessment is legally necessary in Japan. The diffusion from the tunnel outlet has been conservatively predicted as “ground jet”. However, we propose “ground plume” in order to improve the prediction accuracy, and our final goal is the development of new model experiment for ground plume. In this paper, we discuss the approximation of similarity law and carry out the simple tunnel outlet flow.

Keywords: ground plume, ground jet, tunnel outlet, pollution

1. はじめに

現代社会は多くの交通機械（自動車、飛行機、電車、船舶など）を必要としている。特に自動車は手軽で便利な移動手段として世界中で必需品となっており、本学の交通機械工学科では、自動車を主体とした教育研究を実施している。

その反面、モータライゼーション(motorization)の進展と共に交通環境の悪化、交通安全の不安、廃車処理問題を惹起している。従って、今後は環境に優しい自動車の開発研究教育へ方向付けていく。

交通環境悪化の改善において、環境に優しい自動車の開発は当然のことながら、利用者への適正指導（交通流の改善、交通情報の提供）および道路の適正立地が総合的に考えられなければならない。道路の適正立地を目的として、日本では道路を建設するに当り道路環境アセスメントが必要とされている。このアセスメントでは、自動車排出ガスによる大気汚染をはじめ、走行に伴う騒音や振動の他、水質や生態、景観まで様々な角度から環境影響を調査、予測、評価することになっている。

外国に比べ日本は山間地が国土の70%と多く、どうしても道路トンネルが多くならざるを得ない。そこで、今回の研究対象を、トンネル坑口から排気される大気質の拡散問題（TOP, Tunnel Outlet Pollution）に限定した。

トンネル坑口拡散の予測は、これまで排気の浮力の影響を考えない ground jet として、安全サイドに予測されてきた。予測技術が十分に確認できないときは、安全サイドの予測を行うことがこの分野で認められているからである。しかし、あまり安全サイドでは無駄な投資になる場合も考えられるので、将来的にはより高精度の予測が必要となろう。そこで本研究では浮力を考慮した ground plume を提案し、予測精度の向上を最終目的としている。

ground plume に関する研究は、国外においても皆無のようである。これは、日本の交通環境が厳しく、トンネル数が多いことに帰因されよう。海外をドライブして、日本がいかに平地が少なくトンネルが多いかが再認識される。

ground plume の研究方法として、①実際のトンネルを用いる現地実験と、②縮小した模型トンネルを用いる模

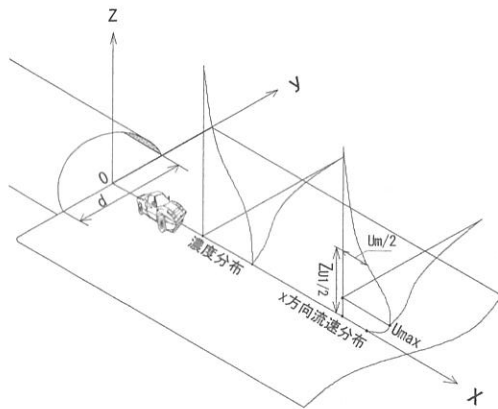
* 1 交通機械工学科 * 2 大学院工学研究科 * 3 交通機械工学科 * 4 機械工学科
平成11年9月30日受理

型実験, それに③CFDを利用した数値計算の3種がある。それぞれ長所短所があるが, ①については関係機関の協力無しではスケールが大きく無理であり, 本研究では②を採用した。③については別の機会に報告する。従って, 本研究シリーズではground plumeの新たな模型実験法の開発を目的とする。

なお, 道路を走行する走行車両の影響調査 (mixing cellを形成する) は, 現在研究中であるが進展しておらず, トンネル断面積に比べ, 車両の等価抵抗面積は小さい (小型車で約2%, 大型車で約9%) ので, 当面無視できるものとした。本報告では, 高濃度となる無風時における模型実験による相似則の近似提案と, 計測法の簡単な検討結果を報告する。

2. ground plumeの相似則の提案

ground plumeは, これまでのground jetの考え方に加



- x, y, z: 直交座標
- d: 噴出口半円直径
- U: 流速 (x方向)
- U₀: 噴出口 (x=0) における流速
- U_{max}: z方向分布における最大流速
- Z_{U1/2}: 半値幅 (U_{max}が半分 (U_{m1/2}) となるzの値)

図-1 Ground plume座標と表示法

え, 浮力の影響を考慮する (図-1)。この場合, ground jetと同様にレイノルズの相似則, 幾何学的相似則を適用することに加えて, 浮力を考慮するため, 同時にフルードの相似則も適用しなければならない⁽¹⁾ (表-1)。縮小モデル実験では, レイノルズの相似則では流速を大きくしなければならないが, フルードの相似則では逆に流速を小さくしなければならないという矛盾が起こる。

よって本研究では流速を下げ, レイノルズの相似則については坑口乱流格子や地面粗度などを用いて乱流を再現できると仮定し, フルードの相似則を適用する。この仮定による模型実験結果を現地実験結果や経験式などと比較し, 再び乱流再現法を改善する。このような方法を繰り返すことによりground plume模型実験の相似則を最終的に確立する (図-2)。

なお, 実物のRe数 (常温の排気風速を4 m/s, トンネルの最大径 (約10m) を代表長さとする) とすると $Re \approx 3 \times 10^6$ となる) は大きく, 基本的に乱流であるとの見方もある。この場合は, Re数には無関係 (Re数独立則) で, 乱流Re数 (Re_t) を相似パラメータに加えることも考えられる。いずれにしてもこの種の研究はこれまで皆無であり,

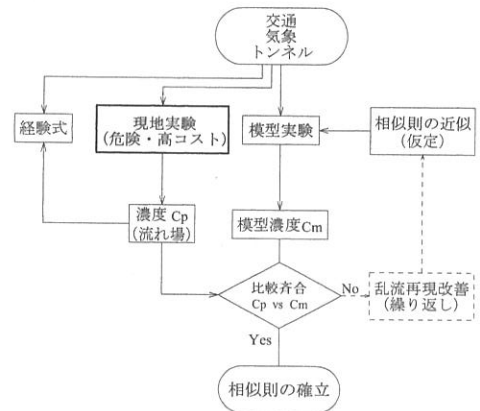


図-2 Ground plume実験の相似則確立手順

表-1 Ground plumeの相似則近似 (仮定, 提案)

現象	相似則	提案	今回の近似
乱流 (粘性流)	$Re = UL/\nu, Re_t$	×	坑口乱流格子及び地面粗度で代替 (仮定)
浮力	$Fr = U/\sqrt{gL\Delta T/T}$	○	温度差もしくは密度差で再現する
乱流拡散	$C^* = UCL^2/q$	○	トレーサースガス (濃度 Sg) を混入する
トンネル形状	幾何学的相似	○	縮尺トンネル模型を製作する
地面粗度	幾何学的相似	×	地面粗度の調整

種々の議論、異論があろうが、誰かが実験して確認してみないと先へ進まない。そこで、あえて「仮説」として上記の提案を行った。

3. 実験装置及び方法

今回は、最も簡単な周囲と温度差の無い ($\Delta T = 0$) の ground plume として、縮率1/100のトンネル形状 (半円形近似、幅員100mm) を一致させ、流速のみを対象とした。本研究の実験装置を図-3に示す。ファンによって送り込まれる空気は、送風部、円形ダクト (長さ1000mm, 直径100mm) を通りトンネル模型 (長さ1000mm, 直径 $d = 100$ mm) 内の厚さ5mmの仕切り板によって上下半分に分けられ、幅1000mm, 長さ2000mmの滑らかなステンレス平板に沿って流速約2m/s (代表長さ d を用いると $Re = 1.43 \times 10^4$) で噴出する。

流速の測定法として、多点を同一時刻において低流速まで測定できる PIV 法⁽²⁾⁽³⁾ (濃度相関法) という画像処理技術を用いる。PIV 法とは、可視化トレーサ及びレーザー光により可視化した流れ場を、画像として撮り込み、そ

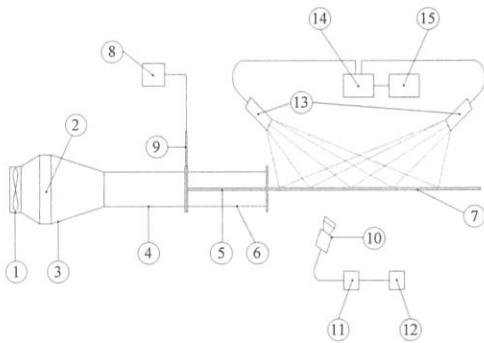
の連続する画像から同一輝度の可視化トレーサ群を検出し、その移動と画像間隔から速度ベクトルを算出するものである。

可視化トレーサとして流動パラフィンを加熱して得られるオイルミストを使用し、円形ダクトとトンネル模型部の結合部からトレーサ注入用ノズル (内径4mm, 注入口 $\phi = 3$ mm \times 10, 注入口中心間隔10mm) を用いて注入する。このとき可視化トレーサ群の追従性を良くし、PIV による解析精度を上げるため、トレーサにマーブル状の分布模様が出るように注入する。これを、画像化時間を制御するため AOM により照射タイミングを制御したレーザー光 (Ar イオンレーザー) をシート状に照射し、CCD カメラによりビデオディスクレコーダに録画する。中央断面 ($y = 0$) について流速を測定する。また、CCD カメラの解像度の関係から、CCD カメラを x 方向に移動して plume を4回に分け録画する。これらの画像について、3秒間 (90Frame) の平均流速を測定する。

4. 計測法の検討結果

図-4は、流速分布をコンター図で表示したものである。①~④は録画面の位置を示す。トンネル模型出口直後で流速が低いのは、出口部のフランジの影による影響である。 $x = 400 \sim 1000$ mm部の地面から十分離れた位置のデータが抜けているのは、渦の発生により流速が負になったと考えられる。PIV は流速を算出する際、周囲のデータと補間する働きがあり、plume の外側に可視化トレーサが存在しなかったためうまく補間出来ず、時間平均を行っても渦の影響が残ったと考えられる。また、 $x = 100, 400, 650$ mmの地面付近の流速分布に流速の低い部分が存在する。この部分は、可視化トレーサが濃く、分布コントラストが小さかったためトレーサの追従性が悪く、低い値となったと考えられる。以上のことから、可視化による流速測定では可視化画像の質が測定結果に大きく影響すると言える。

図-5は、各 x/d に対する流速分布及び半値幅を示す。本来、地面との摩擦により、地面付近 ($z \approx 0$) で $U = 0$ とならなければならないが、本実験では $U = 0$ にはなっておらず、その傾向もあまり示していない。これは、平板がステンレス製であり境界層が薄く、PIV により測定できなかったことが考えられる。この解決法として解析用画像の撮影時に plume に近づき大きく撮影すれば plume の細部まで解析でき、境界層まで測定できるであろう。



- ①送風機
- ②整流格子
- ③送風部
- ④円形ダクト
- ⑤仕切り板
- ⑥トンネル模型
- ⑦ステンレス平板
- ⑧スモークジェネレータ
- ⑨可視化トレーサ注入用ノズル
- ⑩ CCD カメラ
- ⑪ビデオディスクレコーダ
- ⑫PC
- ⑬レーザーライトシートプローブ
- ⑭AOM 発光制御装置
- ⑮Ar イオンレーザー発振装置

図-3 実験装置概要図

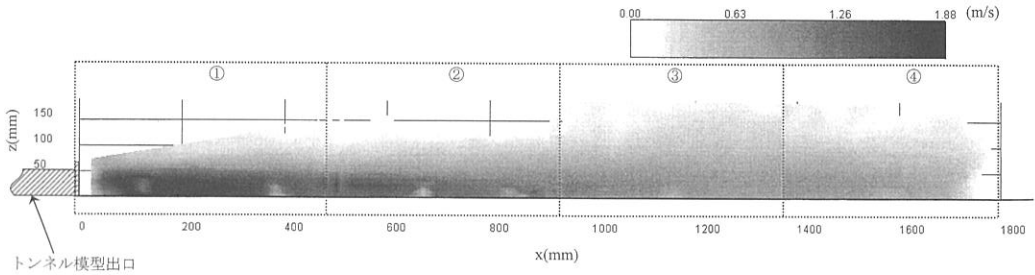


図-4 流速分布のコンター表

図-6に、各x座標における流速の半値幅 ($z_{U/2}$) で無次元化した無次元流速 (U/U_{max}) を示す。各座標において多少のパラツキはあるが、良い相似性が認められる。同種の実験(但し、ground jet で排気流速40.2m/s, $d=50\text{mm}$ とし、 $Re=1.44 \times 10^5$)は、高曾・大橋⁽⁴⁾によりなされており、この結果を実線で示す。Re数が1桁異なるが、これともほぼ一致している。なお、高曾・大橋は坑口より離れた領域 (far field) を『十分発達した領域 ($x/d \geq 20$)』と区分し、この部分において速度、濃度場について相似性が良いとの結論を得ている。本研究では、坑口近くの領域 (near field) でも、実用上は近似的に相似性が認められることが分かった。

図-7は、各x座標における最大流速を U_0 で無次元化し、 x/d に対する最大流速の減衰を示す。これも、多少パラツキはあるが減衰の様子を良く示している。これについても高曾・大橋は実験(高曾・大橋は、代表長さとして半円形の噴出口 ($d_{eq}=30.2\text{mm}$) を採用しており、これを円形直径 ($d=50\text{mm}$) に換算して表示している)を行っている。無次元流速分布(図-6)と同様、Re数に相異があるもののほぼ一致しており、本実験では測定して

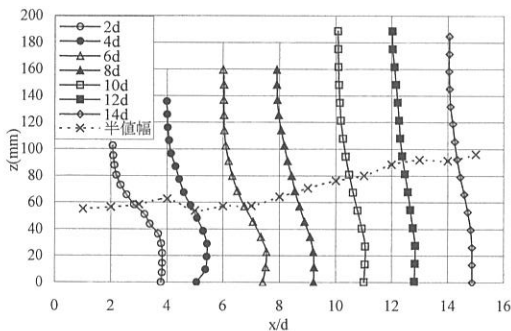


図-5 中央断面上の流速分布

いない $x/d=17$ 付近以降についても一致しそうな傾向を示している。図-7において分布に段が現れている。この点は、 $x/d=5, 9, 14$ 付近であり plume を4回に分けて録画した画面の切れ目に相当する。これは、画像の違いが影響していると考えられるが、詳しい原因を断定するには至っていない。

図-8は、半値幅を d で無次元化し、 x/d に対する半値幅の成長から拡散の様子を調べる。これより、多少パラツキはあるが、減衰の様子や半値幅の成長の様子を良く示しており、高曾・大橋の実験結果に比べ全体的に2割程度小さい値となった。

5. 現地実験結果との比較

図-9は、図-7の横軸を現地寸法に換算したものである。日本道路公団⁽³⁾が現地実験により流速の減衰式を

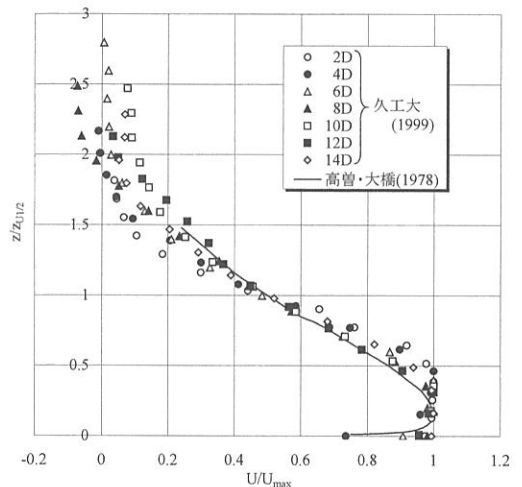
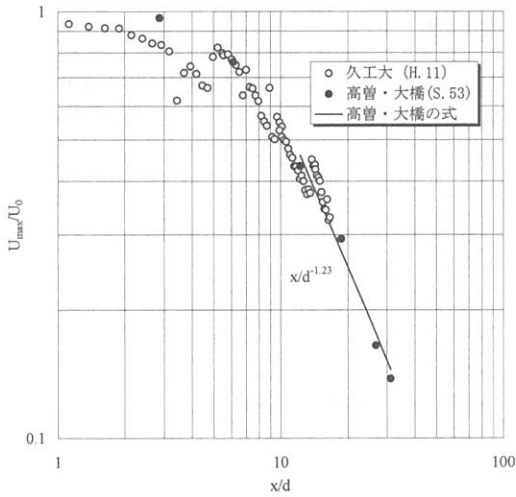
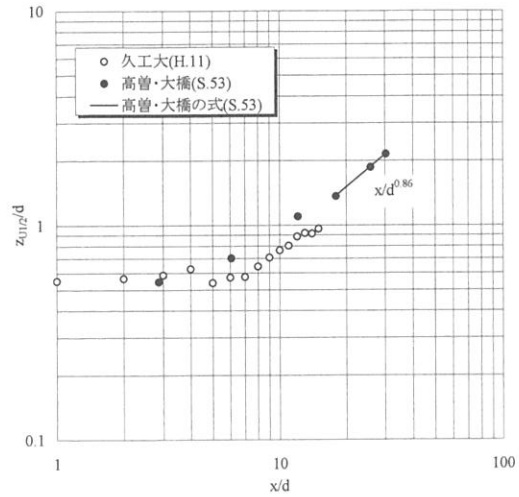


図-6 無次元流速分布



図一七 最大流速の減衰



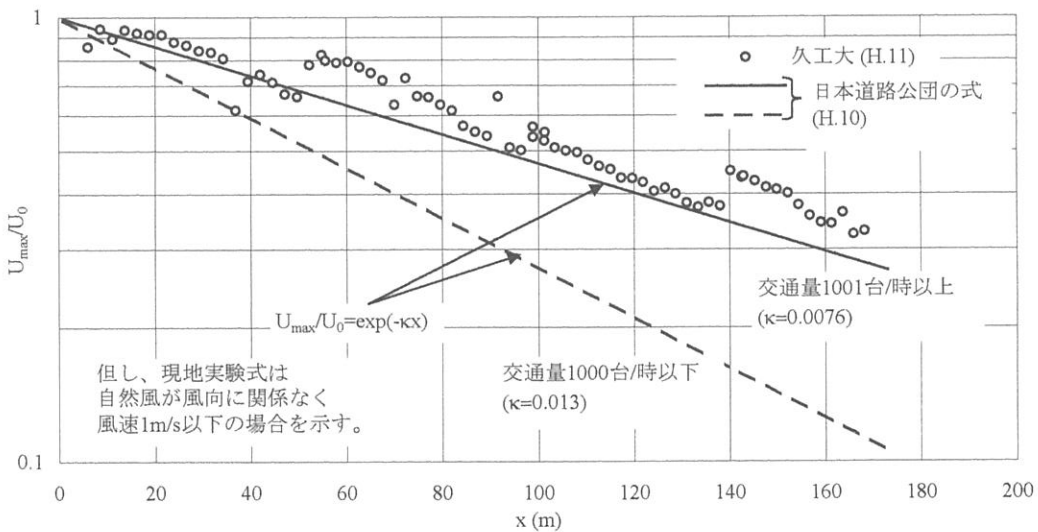
図一八 半値幅の成長

求めており、この現地実験式を直線で示す。これから本実験結果は、交通量1001台/時以上と概ね斉合している。しかし、走行車両を再現していないので交通量1000台/時以下と斉合する必要がある。今後、地面粗度を増加すれば斉合するものと期待される。

現地実験は、スケールが大きく気象変動の影響を受けるので、きわめて困難で費用が掛り、かつ危険である。このため、簡単に「現地実験式」と言っても、その裏には並々ならぬ苦勞が秘められている。このことを熟知した上で、図一九を見る必要がある。

6. むすび

- 1) 今回提案した ground plume に関する相似則近似は無謀ではなく、流速減衰については有望であるとの見通しを得た。
- 2) 「乱流格子なし」でも $Re > 10^4$ であればほぼ乱流を再現していると言えよう。
- 3) Re 数は違うものの、高曽・大橋の結果と半値幅を除きほぼ斉合しており、PIV は同時に多点を測定できるので、利用法を改善すれば大変有用であることが分か



図一九 最大流速減衰の現地実験との比較

った。

本研究は、既述したように ground plume 模型実験法の開発研究の第一報である。急いだために実験法、計測法についても、かなり粗雑なところがあることは否めない。交通環境に関連する実験設備が皆無であった本学にての、2年経過後の現状報告ともいえる。ご指導賜った、建設省、土木研究所、日本道路公団、産業環境管理協会、三菱重工(株)、アジア模型(株)、他の環境関連機関に心より感謝し、今後のご協力をお願いする次第である。また、御支援頂いた本学の角名誉教授、倉元教授、倉元研究室ならびに井手研究室の院生、卒研生、に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Y. IDE, S. UHEYAMA and K. KOBAYASHI, Wind Tunnel modeling of gas diffusion from a road tunnel outlet, The science of the total environment, pp. 211-222. (1987)
- (2) (社)可視化情報学会, 実践集中講義 PIV の要点 (1999)
- (3) 吉岡英樹, “濃度相関法による流れ解析とその問題点の研究” 平成9年度久留米工業大学大学院修士論文集 (1997)
- (4) 高曾 徹, 大橋秀雄, “接地半円ジェットの流れ拡散(平均速度場および濃度場)” 日本機械学会論文集(第2部) pp. 1266-1274. (1978)
- (5) 日本道路公団, (社)産業環境管理協会, 複雑地形における自動車排出ガス拡散研究 総合報告書 pp. 177-184. (1998)