

1 まえがき

道路トンネルにおいては、トンネル内で排出された自動車の排気ガスがトンネルの坑口から一度に大気に放出されるため、しばしば局地的な大気汚染が問題となる。ところがトンネル坑口付近は多くの場合地形が複雑であり、そのため大気の乱れが著しく大気汚染の予測をすることはきわめて困難である。このため一般の道路に適用できるようなブルーム・モデルなども、トンネル坑口付近の大気汚染の予測には用いにくい。他の方法としては、拡散模型風洞においてシミュレートするやり方と理論に基づいた数値解析を行う方法がある。現在のところ数値解析を十分な精度で行うことは電子計算機の性能上の制約から早急には困難であろうと思われる。そこで風洞実験でとりあえずの予測手法の確立をはかることとなった。

風洞による模型実験は、数値計算よりも少ない入力情報でともかくも濃度分布が把握できるという利点があるが、相似則が確定されていないし実験費用も多くなるという難点もある。

本報告書は風洞における模型実験の結果を報告し、それと現場における計測とを比較して相似則及びその評価方法について若干の提案を行った。

2 実験装置

拡散風洞内に地形（坑口トンネル）模型を置き、風洞気流を所要の風速（風向）に合せ、模型車を走行させるから坑口排気（トレーサーガスを含む）を坑口条件で出し、坑口周辺の濃度分布を計測した。

実験に使用した風洞及び主要諸元を図1に示す。風洞は吸入式エッセル型で測定部は幅6m、高さ3m、長さ24mである。

地形模型の縮率は $\frac{1}{200}$ である（図2）。使用風洞（高さ3m幅6m）での閉そく率（BR）は再現される地形の高低差を約70mとす

$BR = 70m \times \frac{1}{200} \div \text{風洞高さ} 3m = 11.7 (\%)$ である。

実際の車は自走であるが、本実験での車はベルト上に縮率を考慮した所要の車頭距離で模型車を取付け、道路端に設けたモーターを駆動することにより、ベルトを索引し外力走行させた。走行速度は、このモーターの回転数を検出し制御した。点源の排煙（トレーサー）はトンネル内の「型」形状のガス吐出孔から排出させた。

なお、坑口の吹出風速を制御するため、トンネル内に空気噴流（実際のトンネル内に設置されているjet

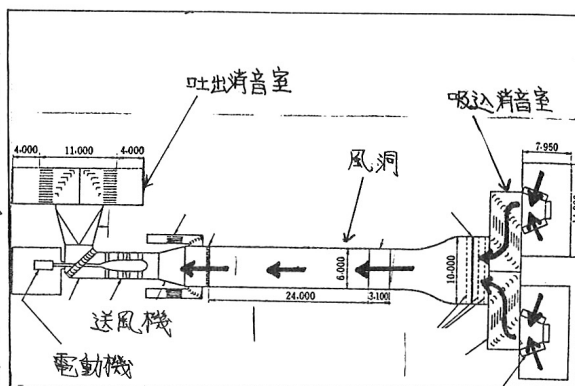


図1 風洞全体図

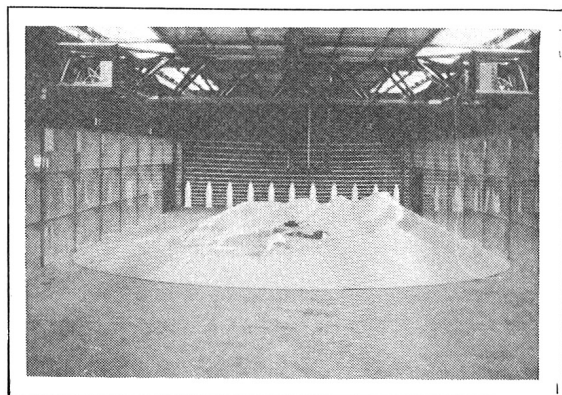


図2 風洞内の地形模型

fanに相当する。)を入れた。

AT (C_2H_4 ガス) は、坑口で充分一様濃度になるようなトンネル内部の位置で排出させた。

3. 実験方法

3.1. 相似則

模型実験をやるには常に相似則に注意を払う必要がある。模型でおこった現象が現場においても同じように発生するか否かは、どういう相似則に従って実験を行ったかにかかっているからである。相似則を決定する方法は一般に次の通りある¹⁾。

① Buckinghamの π 定理と次元解析を用いる方法

② 現象のメカニズムについて考察し、現象を支配する支配的要因相互の組合せによって無次元量を得る方法

③ 現象を支配する微分方程式の係数の比をとる方法

以上のうち、ここでは②の方法をとることにした。トンネル坑口付近の大気汚染というような複雑な現象に対して比較的簡単に適用できるからである。

まず坑口付近の自動車排出ガスの拡散現象に関するメカニズムを図-3のように考えた。図-3の支配要因すべてについて考慮することは不可能である。そこで次のような近似を行う。

① 定率風の仮定 (定常状態を実験解析の対象とする)

② 中立大気、断熱境界、排出ガス密度差の無視 (すなわち熱力学的要因をすべて考慮しない。これは主として実験手法の制約からくるものである。)

③ 乱流再現の仮定 (大気中の乱流はほぼ等方性乱流とする。今回、風洞の基本実験では自然風、坑口風ともに実車の風速の $\frac{1}{2}$ の風速に設定したが、それが風洞内の乱流構造は、現場とほぼ相似に再現されているものとする。すな

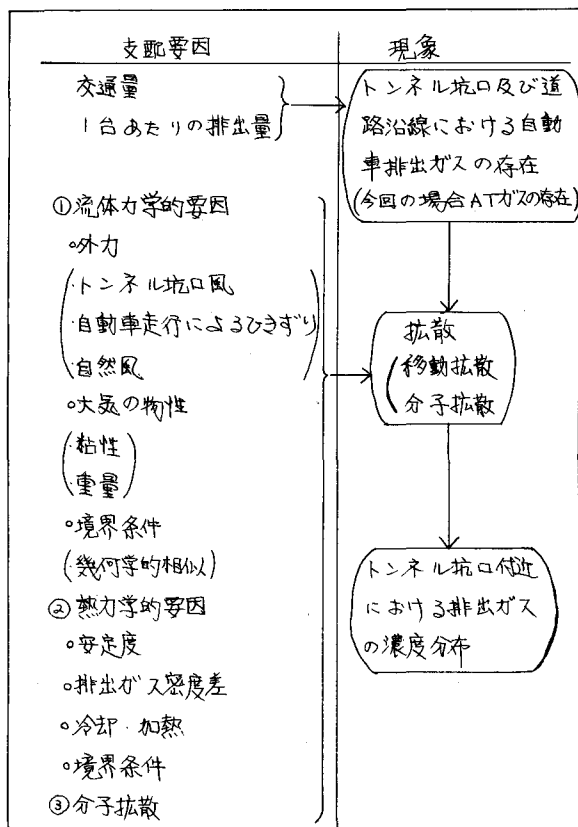


図-3 トンネル坑口付近の大気汚染のメカニズム

表-1 Run 1の実基条件と風洞条件

	テストNO.	自然風の 風向	自然風の 風速(%)	坑口風速 (%)	交通量			
					交通	速度	車頭間隔	投影面積
実基条件	Run 1-0	NE	3.0	7.0	一方	65 km/h	300 m	3.22 m ²
風洞条件	Run 1-1	NE	1.5	3.5	一方	4.51 %	1.25 m	3.22 cm ²

表-2 Run 2の実基条件と風洞条件

	テストNO.	自然風の 風向	自然風の 風速(%)	坑口風速 (%)	交通量			
					交通	速度	車頭間隔	投影面積
実基条件	Run 2-0	W	6.0	1.5	対面	55 km/h	100 m	3.22 m ²
風洞条件	Run 2-1	W	3.0	0.75	対面	3.82 %	0.5 m	3.22 cm ²

の乱れは、自動車の速度よりもその圧力効果により、マより強く支配されるものとする。)

また、今回の場合、現地のA・T実験を解析の対象とするのが自動車排出ガスに関する近似は必要でない。以上の前提の結果満足すべきパイナンバーは次のようになった。

l/L (車頭パイナンバー), $A_c V_c^2 / L^2 U^2$ (自動車走行の圧力パイナンバー), $C U L^2 / g_e$ (濃度パイナンバー), ここに l : 車頭距離, L : 代表長さ, A_c : 車投影面積, V_c : 車速, U : 風速, C : 濃度, g_e : ガス排出量, 第1と第2のパイナンバーは自動車走行による乱れの相似則である。

また縮率は、模型縮率 $1/200$, 風速縮率 $1/2$, 車速縮率 $1/4$, とした。

3.2. 実験条件とケース数

今回解析の対象とした実基条件は2つあり、それぞれ昭和50年と昭和51年に当研究室が実施した現場計測の資料をまとめたものである。それぞれ $Run\ 1$, $Run\ 2$, と呼ぶことにし実基を示す場合 $Run\ 1-0$ とし、風洞実験を示す場合 $Run\ 1-1$ と書くことにする。 $R1-0$, $R2-0$ の実基条件を3.1に述べた方法で風洞模型実験のパラメーターに換算したものを表-1と表-2に示す。

今回の実験では以上の模型実験の他に、さらに各種のパラメーター(自然風の風向、風速、坑口風の風速、車速等)を変化させた模型実験を $R1$ と $R2$ についておのおの9ケース、計18ケース行った。それらを、 $R1-2$, $R1-3$, $R1-4$, ..., $R1-10$, $R2-2$, $R2-3$, $R2-4$, ..., $R2-10$, と呼ぶことにし、基本風洞実験 $R1-1$, $R2-1$ と区別する。どのようなパラメーターをどのように変化させたかは、その1部を表-4, 表-5に示す。

これによって、各パラメーターが風洞実験の濃度分布にどのような影響を与えるか知ることができ、またこれらの風洞実験のうち基本風洞実験より、より良く現場と一致するものがあれば相似則自体を見直すことも可能である。

4. 実験結果

4.1. 実験結果の評価法

模型実験の価値は、それによって現場での状況を予測することにある。ある模型実験手法によって予測ができると断定するには、現場における計測値と模型実験における計測値を比較して確かに合っていることを確認するための確認実験 (pilot experiment) が必要である。今回行ったのはこの確認実験であるが、模型実験の計測値が現場の計測値と合、合っていないかをどのような基準で判断すべきなのか問題となった。

今回までの実験で考えられた評価方法を表-3に示す。実験の当初重視された評価法は(a)の相関係数による方法であった。しかし相関係数には次のような風洞実験にはなじまない点があることがわかった。すなわち、

① 風洞実験に特有な計測値のバラッキをカバーできない。一つままとびぬけて大きい濃度があった場合、もしその値が合、合っていると相関係数は非常に高くなり、逆にもし合、合っていないと相関係数は非常に低くなる。つまり1点の計測値のために他の数十点の計測値の意味がなくな、もしょうような現象がおきる。そうした値を捨てるのも1つの方法ではあるが、相関係数表示では捨てるべきか否かを判断するのも困難である。

② たとえ相関係数が高くとも、1つの相関係数にいろいろの濃度等高線が考えられるわけで、実験の使用目的から考えれば問題がある。

表-3 風洞模型実験の評価法

	主たる観点	記号	細項目
評価法	Digital (数値で確定的にどの程度合、合っているか判断すべき)	a	模型と現場との濃度の相関係数をとる
	↑ Analog (目ざみで合、合っているかどうか判断する方法)	b	模型と現場とで濃度の回帰直線をつくり係数を比較する
		c	濃度減衰をグラフに描き、目ざみで合、合っているかどうか判断する
		d	濃度等高線図をみ、合、合っているかどうか判断する

そこで今回の実験では目ざみま直観的に判断しやすい(1)の濃度等高線による評価方法を採用することにした(相関係数は補助的な評価基準とするのが良いと思われる)。

それからもう一つ付け加えておきたいことは濃度を無次元化する手法についてである。濃度を無次元化する式は一般に次式による。

$$C^* = \frac{CUL^2}{\phi}$$

C^* = 無次元濃度, C = 計測した濃度, U = 自然風の風速, ϕ = トレーサの排出量, L = 代表長さ。自然風の影響の強い平地における拡散を扱うには上式が適当であろう。しかし、トンネル坑口付近(坑口より50m×100~150mの範囲)の拡散を対象とする時には自然風よりも坑口風の影響の方が強いので、上式の U に自然風の風速を代入するかわりに坑口風の風速を代入した方が妥当だと思われる。解析の結果もそうした無次元濃度のものがよく現場と合致した。

4.2. 実験結果

上記のように坑口風速を用いて無次元化した現場と模型実験の濃度等高線を、図4~図17に示す。図4から図10まではRun1について、図11から図17まではRun2について示す。

5. 実験によって明らかになったこと。

今回の実験の直接の目的はトンネル坑口を選定する際大気汚染の状況を予測し、もし基準値を上回るならば対策を施すということにある。こうした使い方をできるようにするためには現地において平面的に10m~20mの精度で比較的正確な濃度を予測しなければならない。実験結果をみれば明らかのように、現在の風洞実験は常にこうした要求を満足しているとはおぎらない。とくにRun2については比較的良好な結果を得ているがRun1については模型実験のすべまが危険サイドの結果を示している。今後実験方法を改善する必要がある。

実験方法の改善の手がかりの1つとして、坑口風速 V_g と自然風の風速 U の比(V_g/U)がある。模型実験においては V_g/U が大きいほど拡散領域は広がるようである。このことは実験条件をきめる際に考慮しておいた方が良いことである。

もう1つの問題点は整流板である。整流板というのは地形模型のまわりに設置する、風洞底面から地形模型場の高さまでのり面の板である。整流板によって地形模型の境界条件としてあまり乱れていない水平な自然風を与えようとしているわけであるが、現在のところのり面勾配をどのくらいにすれば良いかわからない。この点についても検討が必要であろう。

参考文献

リ江守一郎、D.J.シューリング：模型実験の理論と応用、技報堂、P.P.28~32。

試No.	風向	自然風速 m/s	坑口風速 m/s	V_g/U	備考
Run 1-1	NE	1.5	3.5	2.33	他の条件 については 表-1の風洞 条件と同じ
Run 1-2	NE+11.25°	1.5	3.5	2.33	
Run 1-3	NE	3.0	3.5	1.17	
Run 1-4	NE	1.0	3.43	3.43	
Run 1-5	NE	1.5	5.3	3.53	
Run 1-6	NE	1.5	1.75	1.17	

表-4 Run 1の模型実験条件

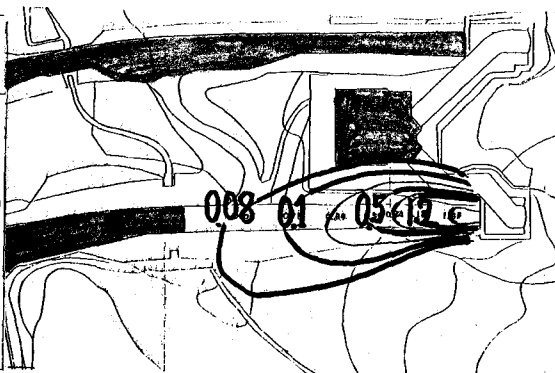


図7 Run 1-3 自然風速比 2.0

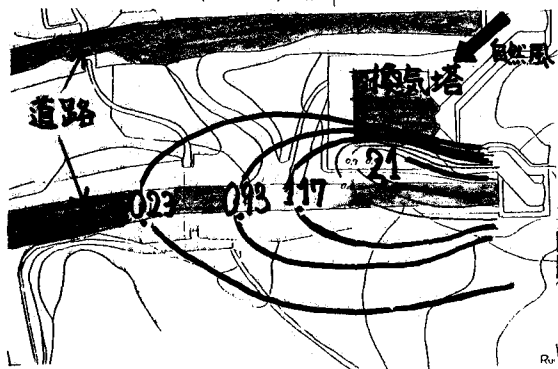


図4 Run 1-0 現場計画

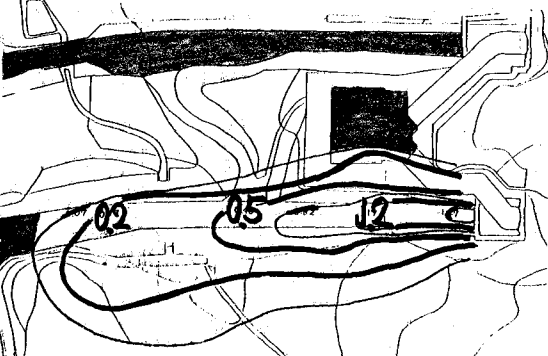


図8 Run 1-4 自然風速比 0.5

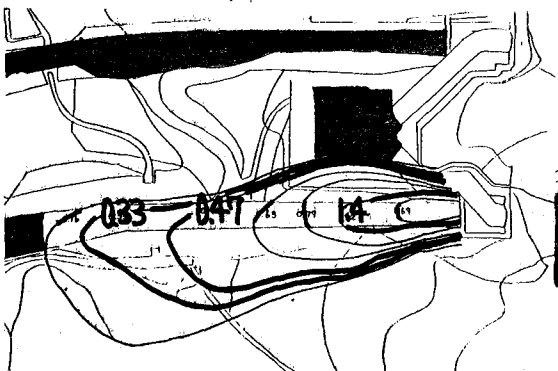


図5 Run 1-1 基本風洞実験

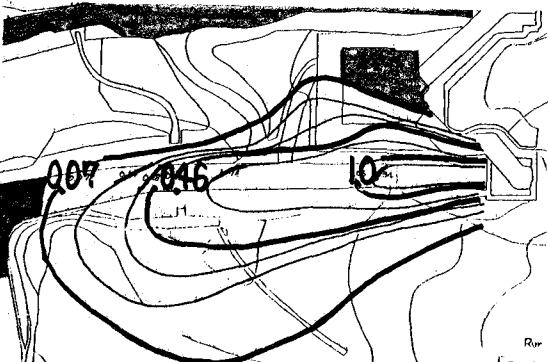


図9 Run 1-5 坑口風速比 1.51

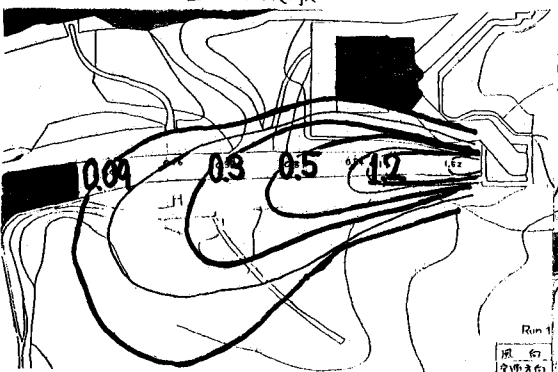


図6 Run 1-2 自然風向 NE+11.25°

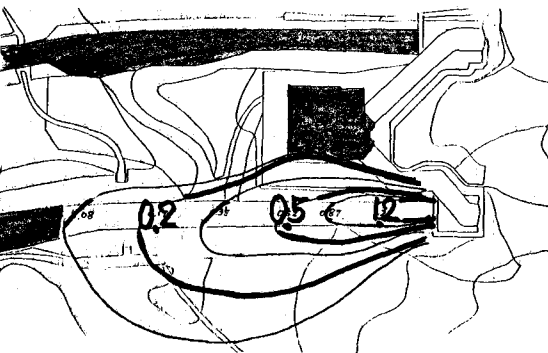


図10 Run 1-6 坑口風速比 0.5

テストNo.	風向	自然風速 m/s	坑口風速 m/s	V_g/U	備考
Run 2-1	W	3.0	0.75	0.25	他の条件 については 表-2の風 洞条件と同じ
Run 2-2	W+11.25°	3.0	0.75	0.25	
Run 2-3	W	6.0	0.75	0.13	
Run 2-4	W	1.5	0.75	0.51	
Run 2-5	W	3.0	1.50	0.51	
Run 2-6	W	3.0	0.6	0.20	

表-5 Run 2 の模型実験条件

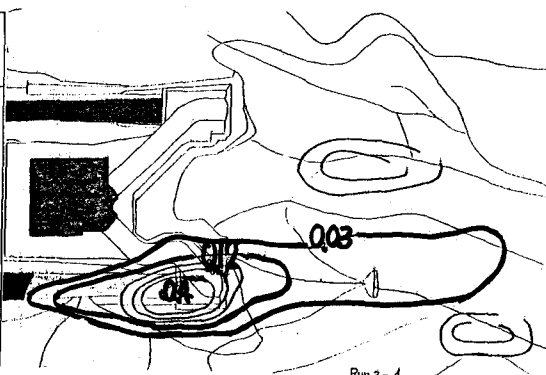


図14 Run 2-3 自然風速比 2.0

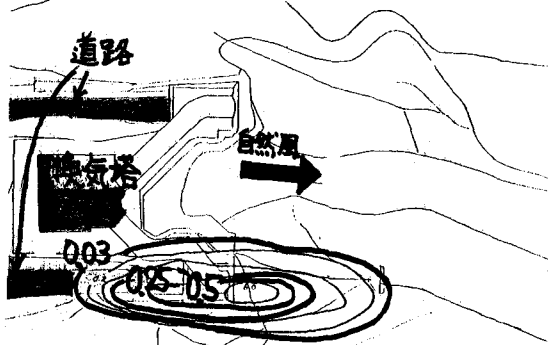


図11 Run 2-0 現場計測

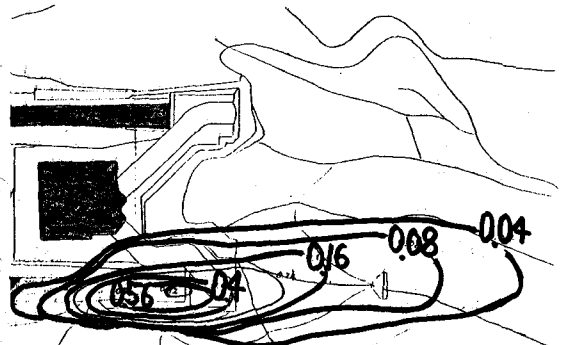


図15 Run 2-4 自然風速比 0.5

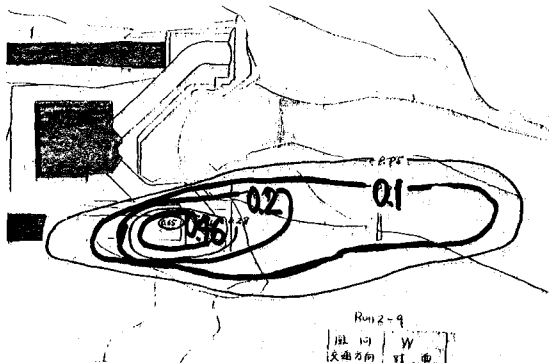


図12 Run 2-1 基本風洞実験

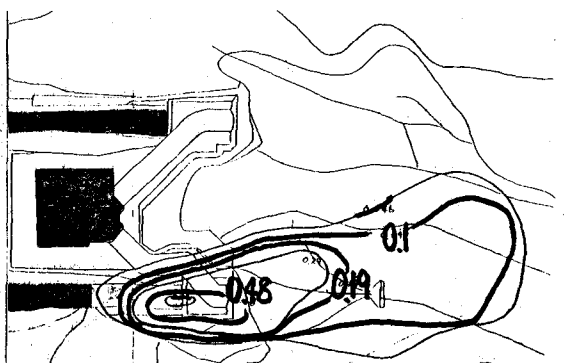


図16 Run 2-5 坑口風速比 2.0

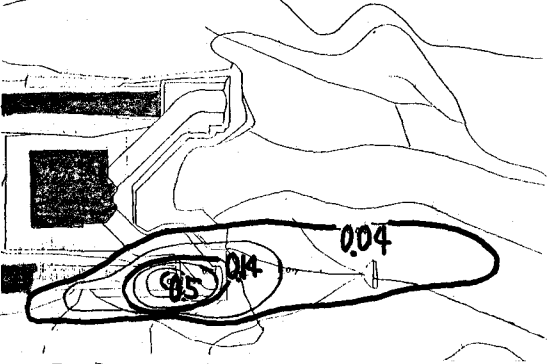


図13 Run 2-2 自然風向 W+11.25°

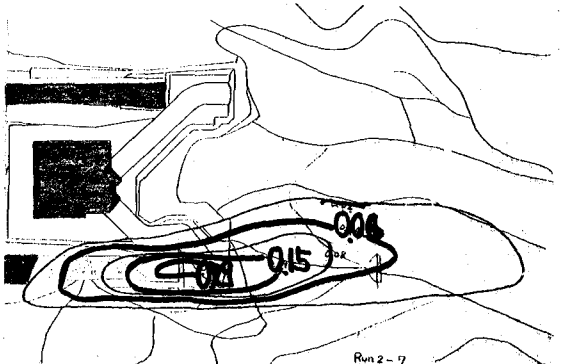


図17 Run 2-6 坑口風速比 0.8