

道路周辺における自動車排出ガスの濃度予測に関する風洞実験

京都大学工学部

○西田 薫

山本剛夫

1 はじめに

都市の大気汚染に関しては、従来はどちらかと言えば都市上空の大気中における汚染物質の拡散というマクロな研究に主体がおかれてきた。Sutton, Bosanquet, 坂上, Pasquill などの拡散式、乱流拡散に関する統計理論、相似理論などは、理想的な平原上しか適用できず、道路周辺の複雑な空間にそのまま適用するのは不可能に近い。しかしながら、路面を含めた道路周辺の空間は市民の生活の場であり、直接に人体の健康、安全性、能率性に及ぼす影響が大きいと予想される。道路周辺における自動車排出ガスによる汚染物質の濃度予測には次の方法が考えられる。

① 現地における拡散調査

② 拡散式による理論的な方法

③ 風洞を用いた模型実験

①の方法は気象条件が制御できないので、特定の条件下における測定にとどまり、普遍的な結論がえられない。②の方法については、理想的な平原上でしか成立しない拡散式を、きわめて複雑な道路周辺に適用することから、精度の点で不可能に近い。

また、数値実験によって算出する方法もあるが、十分とは言えない。

③の風洞実験による方法は、現地との相似性についての問題が残されており、この方法だけでは濃度予測はむずかしい。

以上の観点から、本研究は、既成道路周辺の実測値と、当該場所の風洞実験値との対比から両者の関係を求め、この関係を実験の対照となった道路周辺の自動車排出ガスの予測に用いることを試みたものである。

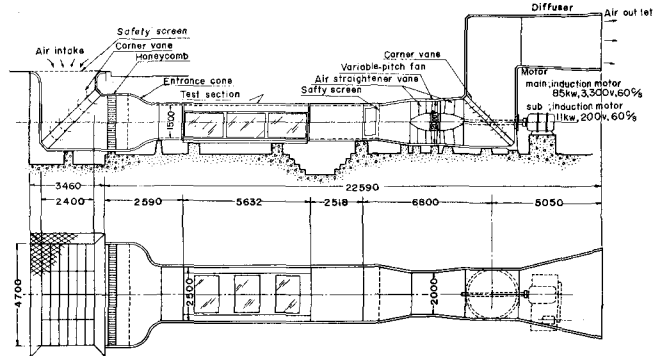


図1 風洞実験装置

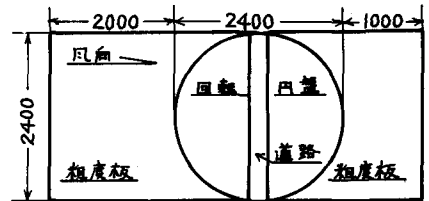


図2 模型台

2 実験装置

実験に使用した風洞は、エッフェル型の吸込式風洞である。図1の左より、吸込洞、縮流洞、乱流制御カート、測定洞、異形洞、送風機、屈曲洞、放出洞となっている。測定洞は、長さ約6m、幅2.5m、高さ1.5m、図3-1 トレーサーガス放出装置(地上)で、送風機は一段動翼可変ピッチの軸流型、プロペラの直径は2mである。本実験の動力には、補助電動機(11kw)を使用した。

実験に使用した模型は、再現される道路周辺の状態に応じて、発泡スチロール、木箱などで製作され、縮尺は $1/12 \sim 1/24$ である。模型は直径2.4mの円盤状の立体地形模型で、模型台に据付けて風洞内に設置した(図2)。この模型台の前部と後部は乱流境界層を発達させるために、 $1/50$ の民家に相当する模型をランダムに配

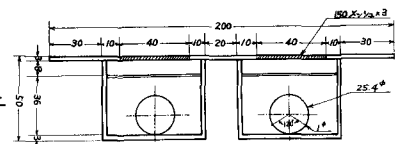


図3-1 トレーサーガス放出装置(地上)

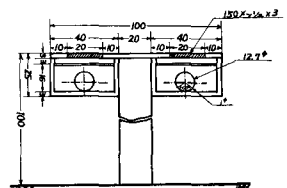


図3-2 トレーサーガス放出装置(高架)

置した一種の粗度板である。中央部が模型を据付けた回転円盤で、風向を制御するために任意の方向に回転できるようになっている。また模型には、道路が面汚染源となるようにトレーサガス放出装置を備えている。地上道路及び高架道路の放出装置は、図3に示すように、ベニア板と、70メッシュの金網1枚と、150メッシュの金網3枚との組合せにより、汚染源強度の均一化を図っている。道路面へのトレーサガスの放出量は流量計によって1~10L/minの範囲で任意の流量に調整できる。

各立体地形模型には、地上濃度及び建物壁面濃度を測定するためのサンプリング孔が設けられている。これらのサンプリング孔の位置は図4に示すとおりで、内径4mmのビニールパイプを介して風洞外へ導く。濃度の平均化と、測定の迅速化のために、採取ガスは、一旦サンプリングバッグに採集し、赤外線式ガス分析計で濃度の測定された。

トレーサガスとして、エタンガス(分子量30)を使用し、空気(平均分子量29)との密度差による影響を無視できるようにした。

3 実験方法および条件

風洞内に、表1に示す8ヶ所の模型を配置し、現地でのCOガス測定時における条件によって、トレーサガス放出装置からのエタン放出量を調整した。実験風向は、実測データから、測定点に汚染物が到達する方向を選んでいる。図4-1~図4-8の上方に、方位を示すとともに、実験風向を記入している。実験風速は1m/secであった。

サンプリング点は、現地実測点に対応する地点を中心とし、さらに後背地となるような地点、必要と思われる地点を測定点とした。なお、測定点は図中では、○印で示す。

4 解析方法

風洞実験によって自動車排ガスの予測を行なう場合、もっとも問題になるのは、現地との相似性である。相似性については、理論的考察がいくつかあるが、拡散の場合に問題となる濃度分布の幾何学的な相似性についての報

表1 実験条件

	地名	道路の名称 および種類	道路幅 m	風向 風速	測定点数	環境条件
M-1	静岡県 牧之原地区	東名高速道路 環状式	24	W,WSW SSW,S ESE,E	9	平坦地 茶畑
M-2	神奈川県 綾瀬地区	東名高速道路 環状式	35.5	WNW,S SSE,ESE	8	平坦地 郊外
M-3	大阪市 生野区	環状式 地上道路	22.4	N,NW WNW,SE	48	市街地 交差点多し
M-4	尼崎市 東本町	環状式 地上道路	65	N,NE ENE	14	工業地帯 大塚-神戸
M-5	尼崎市 南本町	環状式 地上道路	48	W,WSW SW,SSW S,SSE SE	14	工業地帯
M-5	・ (宇別支路)	環状式 高架道路	48	W,WSW SW,SSW S,SSE SE	14	・
M-6	西宮市 (深瀬小)	環状式 地下道 (高架)	49	N,NW W,WSW SW,SSW S,E,NE ENE	23	住宅街
M-7	芦屋市 (宮川小)	環状式 地下道 (高架)	48	N,NW W,WSW NNE,NE ENE	14	住宅街
M-8	芦屋市 (伊東小)	環状式 地下道 (高架)	48	N,NW SW,SSW S,SE SE	13	住宅街

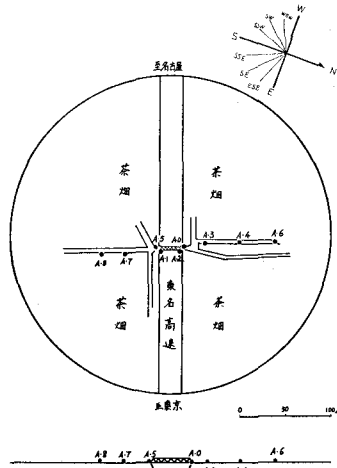


図4-1 東名高速道路牧之原地区(M-1)

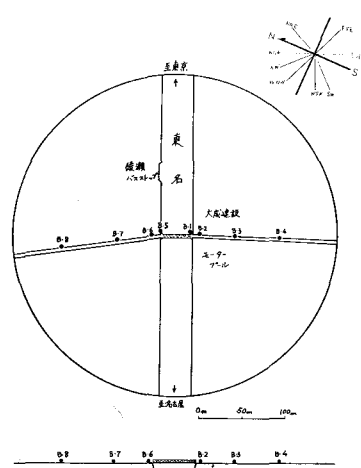


図4-2 東名高速道路綾瀬地区(M-2)

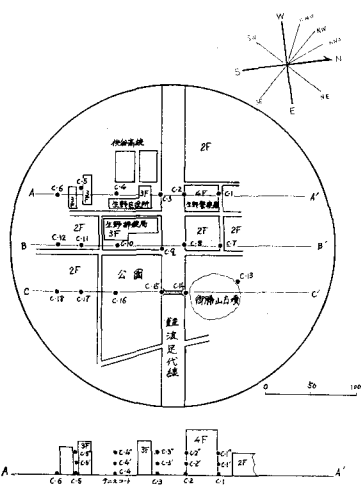


図4-3 大阪市生野区(M-3)

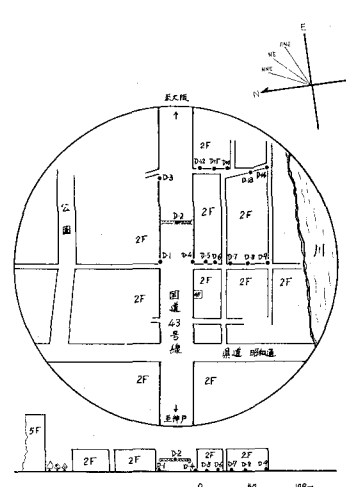


図4-4 尼崎東本町(M-4)

告は少ない。

本研究では、8ヶ所の道路周辺について風洞実験の測定結果と、現地の実測値との対比から実験的に相似性を検討する。実測は自動車排出ガスの指標としてCOについて行なったもので、現地と風洞実験との測定点は一致している。風速やスケールなど異なる条件下で各測定点ごとの濃度を比較し、実験式を求めずには、濃度を無次元化が必要がある。風速 U (m/sec), 単位長さ単位時間当りの汚染物質の排出量 q (cm³/m·sec), 代表長さ L (m), 各測定点の濃度 C (ppm) とすれば、無次元化濃度は $\frac{CUL}{q}$ で示すことができる。実測値と風洞実験値との実験式として、一次式を仮定すれば、関係式は

$$\left[\frac{CUL}{q} \right]_p = K_1 \left[\frac{CUL}{q} \right]_M + K_2 \quad (1)$$

となる。ここで添字 p は現地の値、 M は模型の値を示す。 K_1 , K_2 の定数が定まれば、風洞実験の結果から、現地の濃度を知ることができる。 K_2 は道路周辺のCOのバックグラウンド濃度を示すものである。またここで示した風速(U)は、実験対象地域を代表する平均風速で、野外ではビル屋上などの高所における風速、風洞では境界層外の風速である。また、排出量(q)は走行台数(N), 走行速度(V), 自動車1台当りの単位時間排出量(Q)から次式で求められる。

$$q = \frac{NQ}{V} \quad (2)$$

5 結果と解析

各道路周辺で行なった実測値と風洞実験の結果とを图示すれば、図5-1~図5-8となる。これから最小二乗法により定数 K_1 , K_2 が得られ、回帰直線の傾きが

K_1 であり、縦軸の切片が K_2 となる。これらの結果をまとめると、表2となる。それぞれの相関係数は、 t 検定によって、95%信頼限界で有意性を検

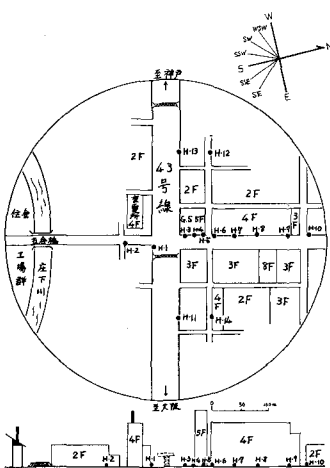


図4-5 尼崎市西本町(M-5)

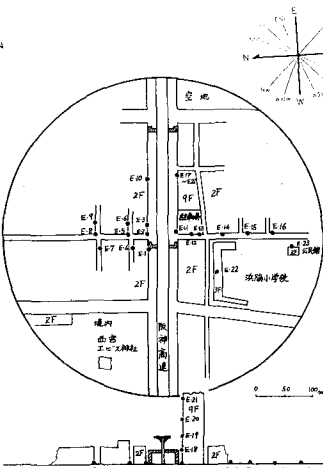


図4-6 西宮市坂脇小学校付近(M-6)

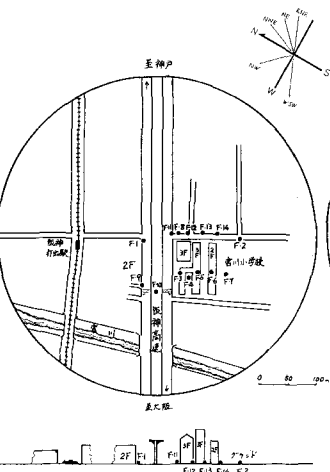


図4-7 芦屋市宮川小学校付近(M-7)

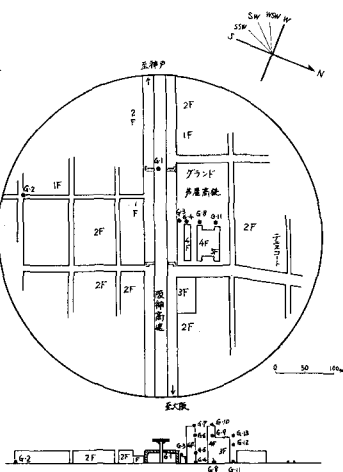


図4-8 芦屋市芦屋高校付近(M-8)

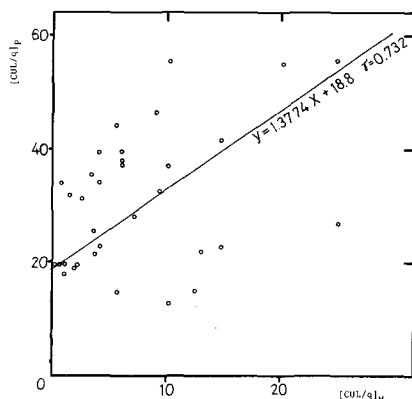


図5-1 実測値と風洞実験値との比較(M-1)

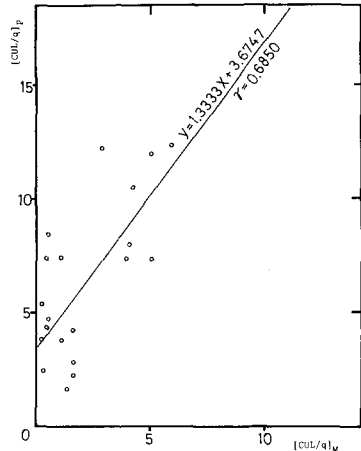


図5-2 実測値と風洞実験値との比較(M-2)

定し、十分有意性を満足するものである。

また、これは、大阪市御堂筋において、著者らが算出した関係式

$$\left[\frac{CUL}{q}\right]_P = 1.31 \left[\frac{CUL}{q}\right]_M + 36.4 \quad (3)$$

とほぼ一致している。

上記の解析で求められた K_2 は、現地におけるバックグラウンド濃度か上かれば、正比例して上がるのは自明であるが、式(1)のパラメータ K_1 の変動の要因が何であることを

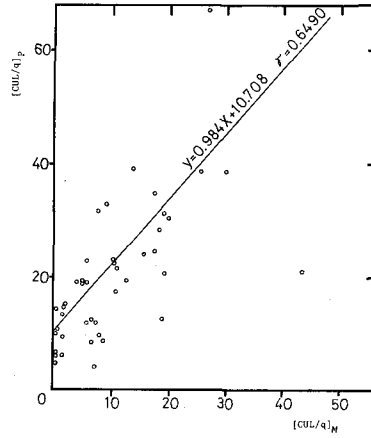


図5-3 実測値と風洞実験値との比較(M-3)

調べる必要がある。式(1)に関係すると思われる物理量を列挙すると、季節、時刻、風向、風速、気温、湿度、大気安定度、雲量、道路幅、模型縮尺、交通量、道路上での平均車速などが関連していると思われる。そこで、実測データから得られる説明変数、交通量(N)、

風速(U)、風向=道路に対する主風向の角度(A)、気温(T)、模型縮尺(L)に関して、高速道路、地上道路、地上道路+高架道路というように3種類の道路形態別に重回帰分析を行なって、 K_1 を決定する方法を検討した。

この結果、有効な説明変数を求め、重回帰式を求めると次のとおりである。

高速道路 (M-1, 2)

$$K_1 = 1.03 - 0.010N + 0.600U - 0.012A - 0.001T \quad (4)$$

($f = 0.834$)

地上道路 (M-3, 4, 5)

$$K_1 = 1.24 + 0.085N + 0.388U - 0.011A + 0.015T \quad (5)$$

($f = 0.704$)

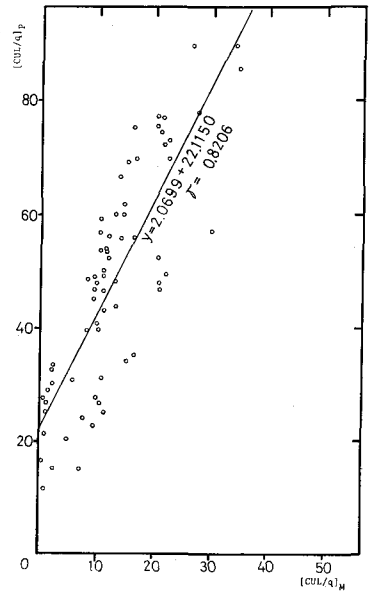


図5-4 実測値と風洞実験値との比較(M-4)

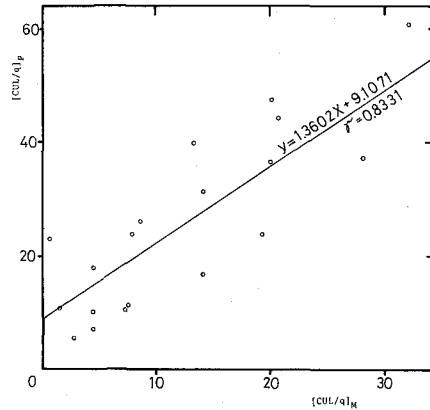


図5-5 実測値と風洞実験値との比較(M-5)

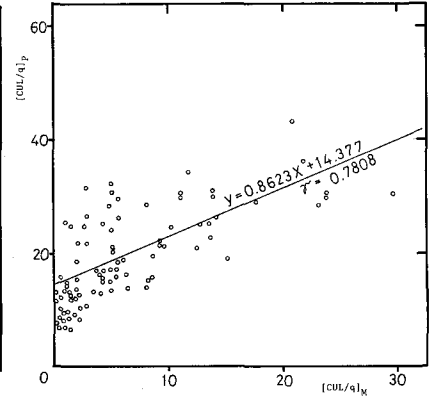


図5-6 実測値と風洞実験値との比較(M-6)

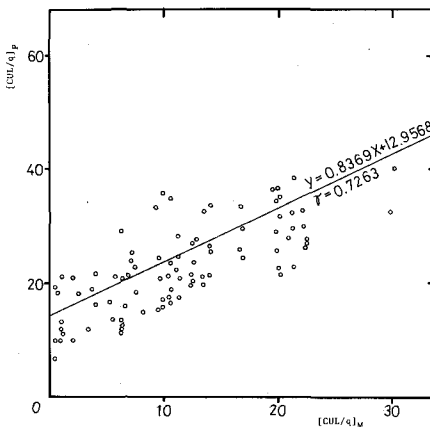


図5-7 実測値と風洞実験値との比較(M-7)

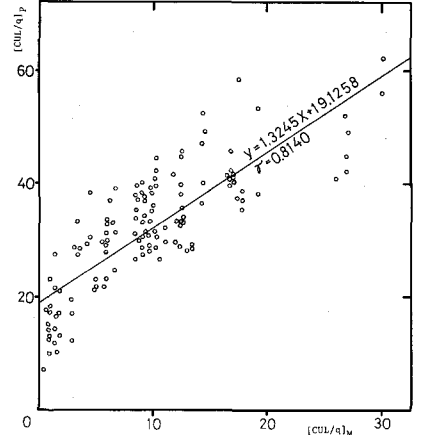


図5-8 実測値と風洞実験値との比較(M-8)

地上道路+高架道路 (M-6.7.8)

表2 K₁, K₂の値

$$K_1 = 2.25 - 0.102N + 0.368U - 0.009A - 0.034T \quad (6)$$

$$(\beta = 0.652)$$

観測点	K ₁	K ₂	観測点	K ₁	K ₂	観測点	K ₁	K ₂	観測点	K ₁	K ₂
M-1	0.732	1.377	18.80	36	1/120	2.021	6.967	観測点			
M-2	0.685	1.333	3.67	21	1/131	2.080	4.098				
M-3	0.649	0.984	10.71	46	1/112	2.021	5.463				
M-4	0.821	2.069	22.12	70	1/224	2.000	11.753				
M-5	0.833	1.360	9.11	19	1/200	2.110	6.210				
M-6	0.781	0.862	14.38	90	1/200	1.980	13.343				
M-7	0.726	0.837	12.96	90	1/200	1.980	10.618				
M-8	0.814	1.324	13.13	116	1/200	1.980	16.699				

ただし、Nは交通量(10³台/hr)、Uは風速(m/sec)、Aは風向=道路に直角風向を90°(°)、Tは気温(°C)である。

6 環境汚染評価手法への応用

解析結果の応用例として、現在問題になっている国道43号線の高架道路建設問題に関して実験を行なった。現在、高架道路のない尼崎市西本町に高架道路を設置した場合、高架道路の建設後に走行する自動車から、既存の環境濃度にはどのような変化をもたらすかを調査するものである。実験は、条件I~IVに分割して行なった。

条件I：高架道路を設置して、国道・高架道路の両方からトレーサーガスを放出

条件II：高架道路を設置して、高架道路のみからトレーサーガスを放出

条件III：高架道路を設置して、国道のみからトレーサーガスを放出

条件IV：高架道路のない現在の状態でトレーサーガスを放出

実験風向は、住居地域を考慮して南寄りの風向(WSW~SE)を選んだ。

以上の結果を表3に示す。次に、現在の道路状態と、将来、高架道路建設後の状態とで、道路周辺の環境にどのような影響を及ぼすかを述べる。

高架道路建設後において、風向SSEを除いて、道路の南側観測点H-1、H-2では濃度が低下している場合が多い。これは、高架道路の汚染源が高くなったために、地上道路から風上側への汚染物の逆流が減少したためと考えられる。

しかし、その他の測定点では、高架道路のため、汚染物質の上方への拡散が押しとどめられ、道路の風下側(北側)への汚染は、全体的に悪化している。

特に、道路に直交する風向SSWでは、測定点H-1を除くすべての点で高架道路建設前より高濃度となっている。道路に平行に近い風向WSWを除いて、南寄りの風向で、観測点H-6より北側の観測点(H-6~H-10)で、著しい高濃度化現象がみられる。これは、高架道路の高さによって、その高さ部分だけ、汚染物質が遠方へ運ばれることを意味している。この事は、著者らの研究による街路空間における高架道路の場合でも、高架道路の建設後の方が、道路周辺で汚染が悪化するという結果とよく一致している。

表3 実験結果

	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7	H-8	H-9	H-10	H-11	H-12	H-13	H-14
WSW	18.0	83.3	4.3	5.2	15.9	47.5	43.6	46.3	51.8	40.9	7.6	45.8	6.7	39.1
SE	82.0	16.7	95.7	94.8	84.1	52.5	56.4	53.7	48.2	59.1	92.4	54.2	93.3	60.9
D-	2.2	0.1	20.8	21.4	12.3	5.3	6.6	5.8	3.4	0.7	61.5	4.5	40.2	5.5
A-	0.8	0.6	22.6	21.9	16.5	10.0	10.8	10.2	7.8	5.4	37.3	8.0	23.8	7.7
SSW	18.0	33.0	7.0	7.0	13.0	34.0	27.0	31.0	38.0	47.0	12.0	36.0	6.0	39.0
SE	82.0	67.0	93.0	93.0	87.0	66.0	7.3	69.0	62.0	53.0	88.0	64.0	94.0	61.0
D-	3.4	0.6	25.3	21.7	14.0	4.4	7.5	7.2	4.3	2.7	28.0	8.3	19.2	8.7
A-	1.1	0.4	32.1	28.7	21.9	18.5	15.6	14.0	10.3	8.5	40.3	8.3	38.3	7.7
SSW	40.0	100	0.9	0.5	3.0	10.0	15.0	16.0	19.4	26.0	1.0	52.0	0	53.0
SE	60.0	0	99.1	79.5	97.0	90.0	85.0	84.0	81.0	74.0	99.0	58.0	100	57.0
D-	4.2	0.3	13.9	14.0	11.7	11.1	9.6	10.0	9.5	7.3	34.3	3.8	17.9	4.6
A-	0.1	0.4	24.3	20.7	14.9	13.4	10.0	8.5	6.8	5.1	34.4	8.0	28.5	6.6
S	100	100	0.4	1.0	0.7	12.0	23.0	24.0	34.0	44.0	3.0	29.0	0	51.0
SE	0	0	99.6	99.0	99.3	88.0	77.0	76.0	66.0	56.0	97.0	71.0	100	49.9
D-	1.9	0.5	15.5	17.3	15.3	13.1	9.7	9.3	7.4	5.7	15.6	4.0	14.6	2.9
A-	0.4	0.1	26.2	22.2	12.9	9.5	8.0	8.0	6.2	5.1	31.8	7.5	38.7	10.8
SSE	100	100	2.0	6.0	25.0	38.0	42.0	44.0	44.0	50.0	3.0	40.0	1.0	33.0
SE	0	0	98.0	94.0	75.0	62.0	58.0	56.0	56.0	50.0	97.0	60.0	99.0	67.0
D-	0	0	27.2	19.9	10.8	7.3	5.6	5.1	4.2	3.5	22.3	6.3	13.6	5.5
A-	2.6	0.4	25.1	16.7	10.5	9.8	7.9	5.1	3.0	0.4	53.6	7.9	57.3	2.9
SE	7.0	50.0	24.0	42.0	46.0	48.0	44.0	43.0	50.0	65.0	1.0	49.0	2.0	52.0
SE	93.0	50.0	76.0	58.0	54.0	52.0	56.3	57.0	50.0	35.0	99.0	51.0	98.0	48.0
D-	6.0	0.2	21.5	11.5	7.2	5.9	5.0	3.2	1.8	0.4	29.2	7.0	48.1	2.3

A：条件Iにおける無次元化濃度 B：高架道路からの寄与率

C：地上道路からの寄与率

D：条件IVにおける無次元化濃度

ただし、 $C_M^* = \left[\frac{CUL}{\beta} \right]_M$ である。上式に、現地における $\left[\frac{NQ}{VUL} \right]_p$ と風洞実験で得られた C_M^* を代入すれば、現地で

の環境濃度 C_p が算出される。

現地での環境濃度は、 $\frac{N}{V}$ に比例し、他の値が一定ならば、 N 、 V 、 Q 、によって環境濃度の立場からみた道路の交通容量が決定される。

また、 N と V との関係は、交通工学の分野で研究されている。例えば、阪神高速道路で行なわれた調査では、次のような経験式が提唱されている。

$$N_s = 366 - 0.470 (V - 47)^2 \quad (8)$$

ここで、 N_s は5分間交通量(台/5分)、 V は平均車速(Km/hr)である。式(8)から、最高の N_s と与えるのは、 $V = 47 \text{ Km/hr}$ である。

自動車の速度 V と排出量 Q の関係は種々の文献に発表されている。

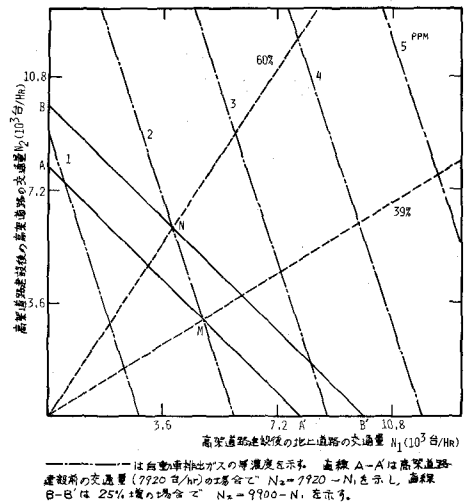


図6 交通量と濃度との関係

以上のように、 V と N と Q は、相互に関係が成立するから、道路周辺の環境基準濃度を満足するような交通量 N が決定される。

次に、汚染源が地上道路と高架道路の複数の場合に、環境濃度と交通量との関係が、いかに変化するかを論じる。

例として、尼崎市西本町の場合について述べる。今、高架道路建設後の地上道路からの汚染に関するものを添字1で表わし、高架道路からの汚染に関するものを添字2で表わす。

式(7)から、高架道路建設後の地上道路による汚染の環境濃度は、

$$C_{p,1} = \frac{N_1 Q_1}{V_1 U_p L_p} \{ 1.268 C_{M,1}^* + 13.86 \} \quad (9)$$

高架道路による汚染の環境濃度は、

$$C_{p,2} = \frac{N_2 Q_2}{V_2 U_p L_p} \{ 1.268 C_{M,2}^* + 13.86 \} \quad (10)$$

となる。道路周辺の環境濃度 C_p は、

$$C_p = C_{p,1} + C_{p,2} \quad (11)$$

として与えられる。 K_1, K_2 の値は全模型の平均値を用いた。

上式から、地上道路の交通量 N_1 と、高架道路の交通量 N_2 との関係は、次式となる。

$$N_2 = \frac{V_2 U_p L_p}{Q_2 (1.268 C_{M,2}^* + 13.86)} \left\{ C_p - \frac{(1.268 C_{M,1}^* + 13.86) Q_1}{V_1 U_p L_p} N_1 \right\} \quad (12)$$

式(12)に、必要な係数を代入すれば、 C_p の変化に対する、交通量 N_1 、 N_2 との関係が求められる。ここで、一例として、 $L_p = 48 \text{ m}$ 、 $U_p = 3 \text{ m/sec}$ 、 $V_1 = 40 \text{ Km/hr}$ 、 $V_2 = 70 \text{ Km/hr}$ 、 $Q_1 = 50 \text{ cm}^3/\text{台} \cdot \text{sec}$ 、 $Q_2 = 62 \text{ cm}^3/\text{台} \cdot \text{sec}$ とし、風向 $S1$ における観測点 $H-3 \sim H-6$ までの無次元化濃度平均値を、 $C_{M,1} = 19.8$ 、 $C_{M,2} = 3.0$ として代入すれば、式(12)は次式となる。

$$N_2 = 9204 (C_p - 0.000338 N_1)$$

$C_p = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ ppm}$ を代入して、 N_1 と N_2 の関係を図示すれば、図6となる。この図は、高架道路建

設後の地上道路の交通量と、高架道路の交通量を与えて、道路周辺の環境濃度を示すものである。例えば、地上道路の交通量3600台/hr、高架道路の交通量3600台/hrの場合に、環境濃度は約16 ppmである。

今、高架道路建設前の環境濃度が、2 ppm とすれば、これに相当する交通量は、風洞実験の結果に基づいて、式(7)から7920台/hrである(建設後の $N_2=0$ の場合と異なる)。

もし、高架道路建設後にも、これと同等の交通量があるとすれば、 N_1 と N_2 との関係は、図上で、 $N_2=7920-N_1$ の直線となる。この直線は、図6でA-A'で示す。この直線と2 ppmの等濃度線との交点Mは、高架道路建設前後において、環境濃度が等しくなることを意味している。これよりも、高架道路の交通量の割合が増せば、建設前よりも環境濃度は低下する。このときの交通量の割合は、地上道路61%、高架道路39%である。もし、高架道路建設後において、交通量が25%増加すれば、そのときの N_1 と N_2 の関係は、 $N_2=9900-N_1$ となる。上記と同様の方法で、交点Nが求められ、このときの交通量の割合は、地上道路40%、高架道路60%である。

しかしながら、車速と交通量との関係は、式(8)で示されるように、高架道路の交通量は、有限であるので、高架道路建設後の環境濃度は、建設前のそれよりも悪化するものと予想される。

7 おわりに

自動車交通量の増加に伴い、道路周辺の環境は毎日に悪化しつつある。このような状況を考慮し、自動車排ガスによる環境汚染度を推定するために、風洞を用いた実験手法について論じたが、今後は、風洞気流と大気との相似問題を解決し、 K_1 、 K_2 に対する安定度の影響を考慮して、予測式をより妥当なものにしなければならないと考える。

謝辞 本研究の基礎となったデータを提供戴いた日本道路公団試験所、大阪市環境保健局、兵庫県公営研究所の御関係者に感謝申し上げます。