

空港周辺大気汚染の風洞実験 —— 塀による拡散効果

佐藤 浩・川上 美代子・作山 喜秋

1. はしがき

空港における離着陸，地上走行，地上エンジンテストなどのように汚染源の高度が低いときに空港の周辺に大気汚染の被害が発生することを防ぐ一つの方法として我々はさきに林による拡散効果の風洞実験の結果を発表した[2] (佐藤，恩田，本橋，作山，1978)．実験は現在も進行中であるが，もっと簡単に考えると空港を塀でかこむことにより周辺住民を保護できる筈である．そこでそれに関連した風洞実験を行うこととした．

塀の効果はコップのふちが水の溢れるのを支えているような静的なものではない．風が極端に弱いときにはそのようなこともありうるが空港から周辺に定常的な風があるときには風は塀によって上空へ吹き上げられ，それと共に汚染物質が舞い上る．しかし，それはまもなく塀からの剥離によって作られた強い乱れによって拡散されて地上に達するであろう．一方，この乱れは，汚染物質を横の方にも拡散するから地上の濃度は下るはずである．これらのことが量的にはどの程度のものであるかということを実際に計測することが我々の目的である．

記号説明

- L : 排出源から塀までの距離
- X : 排出源から測定点までの距離
- X_L : 塀から測定点までの距離
- C_g : 着地最大濃度
- C_{g0} : 塀がない時の着地最大濃度
- C_m : 最大濃度
- $C_m(40)$: $x = 40$ cm での最大濃度
- Y_b : 最大濃度の 1/10 になる巾
- Z_b : 最大濃度の 1/10 になる高さ
- Y_{b0} : 塀がないときの Y_b
- Z_{b0} : 塀がないときの Z_b
- U : 平均風速
- Q_T : 単位時間当りの放出質量
- D : 林の密度
- D_0 : 一番粗の時の林の密度

2. 実験装置

実験には、宇宙航空研究所にある吹出型大気乱流風洞を用いた。測定部は断面 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、長さ 5 m で測定部前部（上流側）に、任意の風速分布が形成できる装置を設置した。この装置に関する詳細は佐藤、恩田、斉藤、1973）[1]に述べられている。その下流に、地面粗さとして玩具のダイヤ・ブロックのプラスチック小片を敷き、下流域ではほぼベキ法則に乗る風速分布となるようにした。ダイヤ・ブロック後端より 5 cm 下流に、排出源として、高さ 4 cm の L 字型パイプを取り付け、排出口周辺の風速と同じ速度で、プロパンガスを放出した。塀としては、幅 4 cm のアルミ板を流れに垂直に立てたものを使用した。

風速測定には、タングステン線の熱線風速計を用い、流れ方向の風速の平均量及び変動量の測定をおこなった。濃度測定には、大倉電気のカスクロマトグラフ MODEL-701 を用いた。その原理は、測定点で、連続的にプロパンガスの混合した空気を吸込み、そのサンプルガスを水素炎で燃焼させ、そのイオン電流から濃度を測定する方法である。ここで風速も濃度もトラバース装置によって、3 次元的に測られるようにセットされている。

図 1 は、測定部を側面から見た概略図である。装置その他は、ほぼ前回の林の場合と同じである。詳細については、先の報告に述べられている [2] (佐藤、恩田、本橋、作山、1978)。

模型の縮尺については、林の場合、樹高に制限があり高さ約 7.5 cm の樹の模型に対して、50 分の 1 (樹高が 3.7 m) あるいは 60 分の 1 (樹高が 4.5 m) 前後が実用的であると思われ

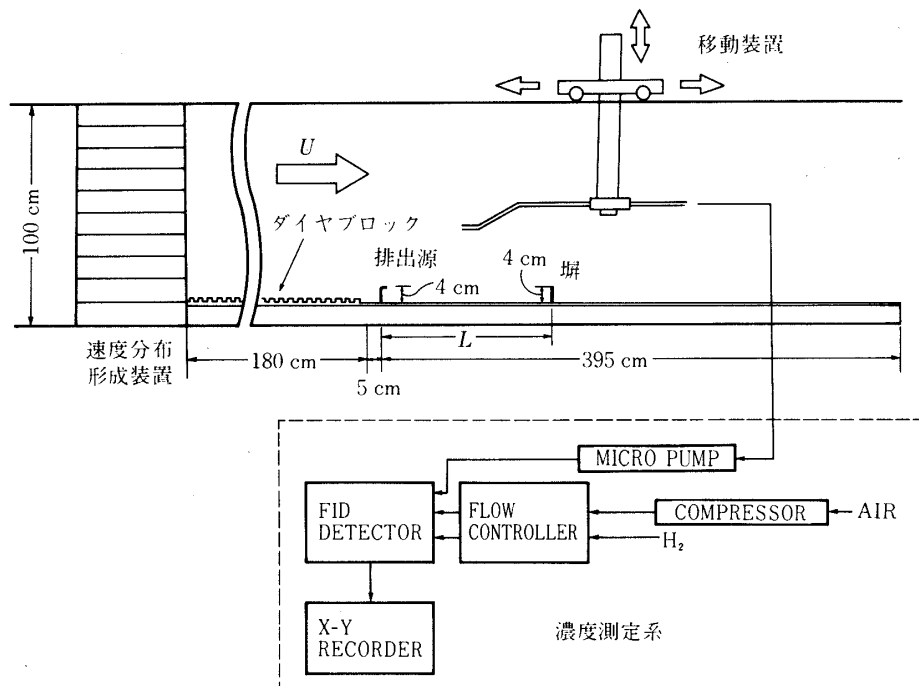


図 1 実験装置と濃度測定系

た。それに対し、人工的な塀の場合、原理的には高さに制限はなく、ほぼ排出高度と同じであるという条件を持つだけである。しかしあまり非常識な高さは意味を持たない。そこで、ここでは先の林の縮尺を使うと、50分の1の縮尺に対して、高さ約4 cmの塀模型は約2 m高の塀に当たり、100分の1に対しては、4 mに当たる。

3. 流れの測定結果

(1) 塀のない場合

測定は、平板の場合（塀なし）と塀の位置が、排出源から40 cm, 80 cm, 120 cmにある場合の4種類についておこなった。平板上での平均風速分布を図2(a)に示す。この時、排出口から床面へ鉛直におろした点を原点とし、風下方向をX、鉛直上向をZ、これらと直交する方向をYとした。この図における原点の風速分布はほとんどベキ法則に乗っている。その時のベキ指数は、約0.36となった。この勾配は、野外では粗度が45 cmのかなり粗い表

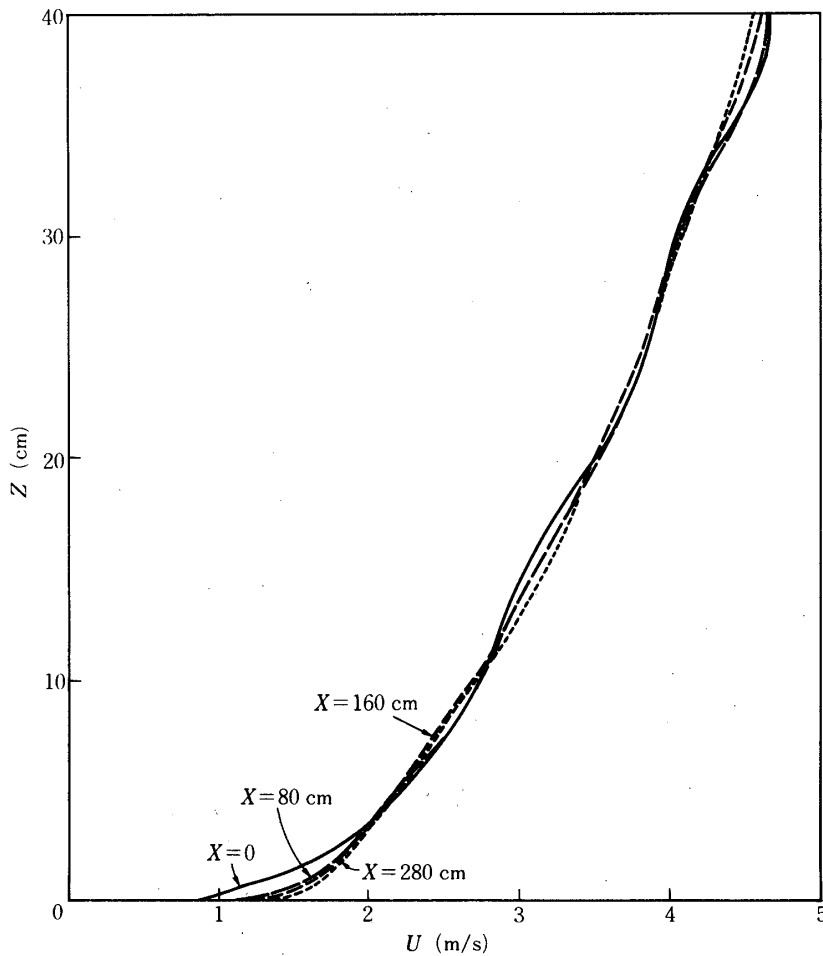


図2(a) 平板上での平均風速分布

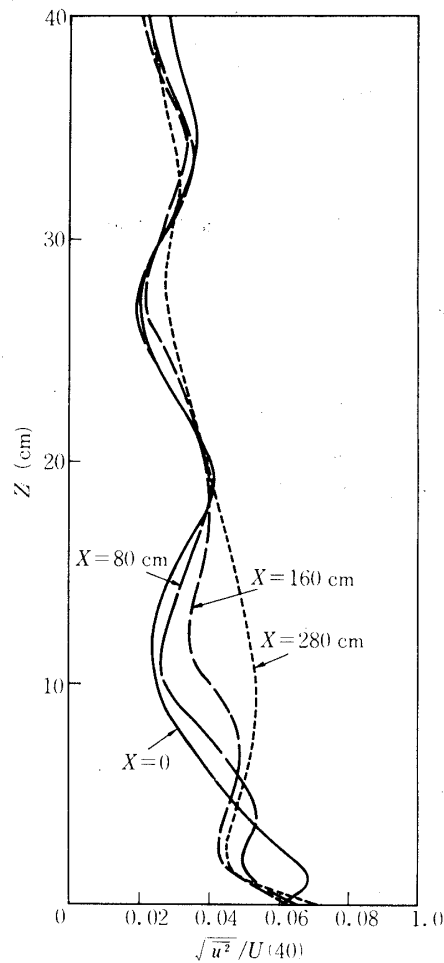


図2(b) 平板上での流れ方向の
風速変動量分布
U(40) : Z = 40 での
平均風速

面上を吹く風に当たる。この風速分布も、風下方向へ行くに従って、床面付近で、少し風速が増加する。先の林の実験では、この分布中に林の模型を置いて、野外で実測された林中での平均風速分布と比較をおこなっていたが、かなりよい一致を示していた。このことから平均風速分布に関しては、自然現象を再現しているものと思われる。大気中における流れ方向の変動量はほぼ平均風速の10~20%ぐらいである。風洞内での変動の分布(図2(b))は平均風速(高さ40 cm)の約4%で、実測値よりも小さい。

(2) 塀がある場合

測定部の風は流れ方向にほぼ一様であるため、塀による風速分布の変化は塀の位置に無関係になると思われる。又、測定結果からもそのことが確かめられている。そこで塀が置かれている点を原点とし、それより風上をマイナス、風下をプラスと取って X_L であらわす。図3

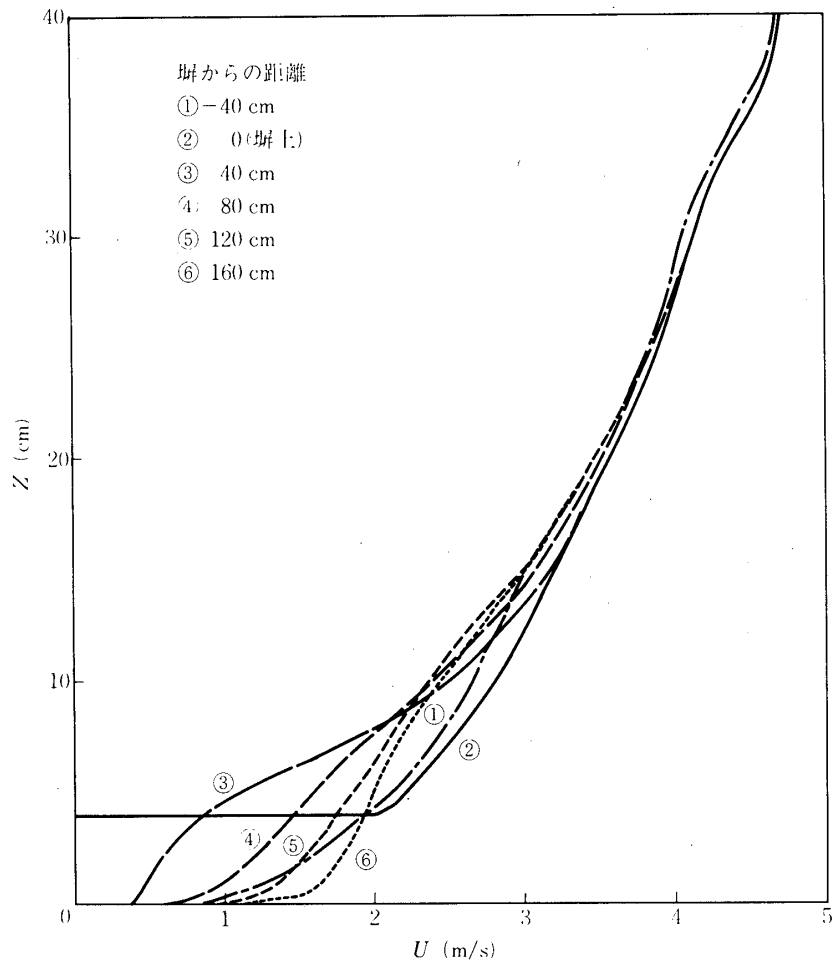


図3(a) 平均風速分布, 塀あり

(a)と(b)に塀がある場合の平均風速分布と変動の分布を示す。塀の上流側では、風速分布に塀の有無に因る差はほとんど見られない。塀の下流では、上流にくらべて床面から10 cmまでの風速が、非常に小さくなっているのが見られる。それゆえ平均風速分布にもかなり大きな塀の影響が現われるのがわかる。

変動量については、塀の後方40 cmの地点で、 $Z = 10 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ の狭い区間に、塀の直前における最高変動量の2倍以上にあたる激しい乱れ場がつけられる。この強い変動域は、下流に行くに従って弱められると同時に、領域が広がってゆく。又、塀がない場合には床面上に変動量の最大値が現われたのに対して、4 cmの塀が存在する時は床面から10 cmぐらい離れた場所に現われる。

このように塀の有無によって、平均風速にも、変動量にも顕著な差が出るが、特に拡散に大きな影響を与える床面から25 cmまでの範囲に著しい変化をもたらした。

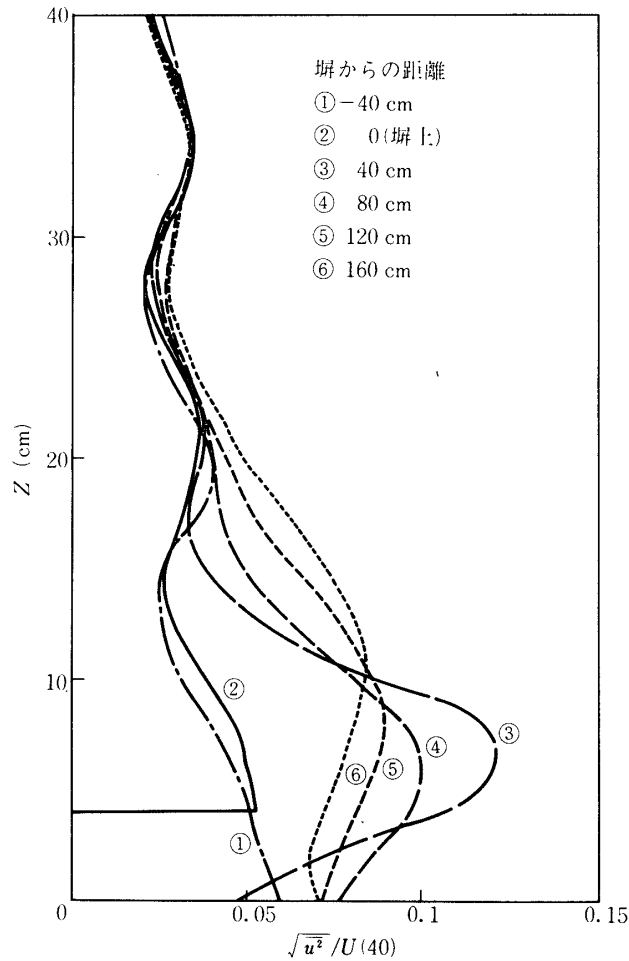


図3(b) 流れ方向の風速変動量分布塀あり
 $U(40)$: $Z = 40$ cm での平均風速

4. 濃度分布

(1) 塀のない場合

今回の排出口の高さは、塀と同じ4 cmに取ってある。この時、この高さでの風速は、2 m/secである。先に述べたように、塀のない場合、すなわち、なめらかな平板上での風速分布は、野外においてかなり粗い表面を持った草原上の分布になるように作られている。そこで、そのように自然現象に類似させた風洞内の拡散実験と、野外での拡散実験がどれくらい異なるかを調べることは重要なことである。比較の方法は種々あるが、ここでは次の方法を用いた。

- (i) 最大濃度の風下方向の減衰率を比べる
- (ii) Y方向の標準偏差の流れ方向への変化
- (iii) (ii)と同じことをZ方向の標準偏差についても行う。

(i)についての野外実験として、1959年から1962年にかけて、Hanfordで大規模におこなわれた実験 (Green Glow と Hanford 30 Series Programs)からまとめた Fuquay, Si-

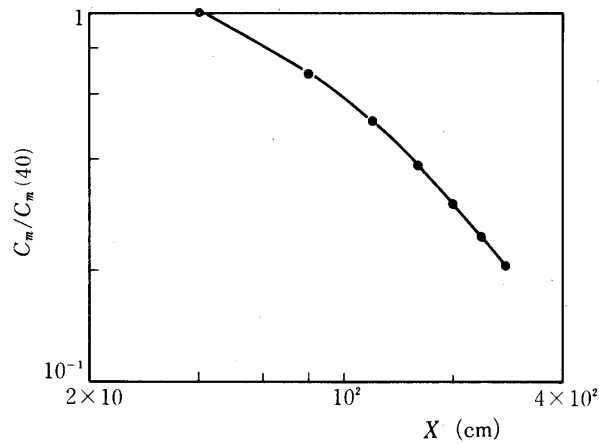


図4(a) 風洞実験から得られた最大濃度の流れ方向変化

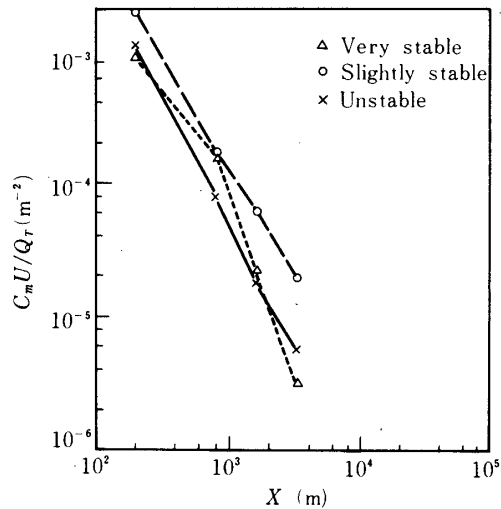


図4(b) 規格化された最大濃度 $C_m U/Q_T$ と距離の関係拡散実験は異なった大気安定度のもとにおこなわれた

mpson, Hinds (1964) の結果 [3] を使用する。図4(a)に風洞実験の結果、図4(b)に野外実験の結果を示す。この時、2つの図で、縦軸、横軸の次元や、スケールが異なるが両対数目盛を用いているため、線の傾きは比較できる。すなわち、濃度がXの何乗で減衰するかを比較する。野外実験の場合、地上源であるので、高煙源の場合と少し値は異なるがこれらの図を比較すると、風洞実験の方が、高煙源であるにもかかわらず、風下方向への減衰の仕方が小さい。すなわち野外よりも拡散されにくい。模型の縮尺を1/50とすれば4cmの扉が2mになり、280cmの距離が140mとなる。また、1/100にすれば4mの扉と280mの距離になる。このことは、 $X = 280$ cm近辺の傾きが野外実験の傾きに対応することを意味する。

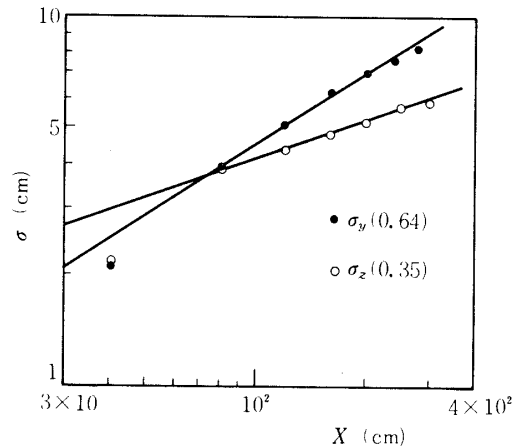


図5 標準偏差の流れ方向の変化, カッコ内の数字は直線の傾きを表わす. 風洞実験

(ii)と(iii)については, 安定度別に分類された有名なパスキル[4]・キフォード[5]の図を用いることにする. 風洞内でのY方向の標準偏差は, $C \propto \exp(-y^2/2\sigma_y^2)$ の拡散式を用いて, 実験結果より導き出すことができる. しかし, Z方向の標準偏差は, 高煙源のため濃度分布が簡単な式には乗らない. そこで, 最大濃度の10分の1になる高さ Z_b を求めた. もし, Z方向がガウス分布であれば $C/C_m = \exp(-Z/2\sigma_z^2)$ ($Y=0$)より $Z_b = 2.16\sigma_z$ となり Z_b は標準偏差のほぼ2倍を表わすことになる. (実際には, 少しガウス分布からずれるようである. 特に, $X=40$ cmでは最大濃度が床面にないため少し大きな値を示す.) 図5に上記の方法で求められた σ_y, σ_z の流れ方向の変化を示す. パスキル図によれば σ_y はXのn乗に比例し, nはおよそ0.8~0.9の値を取る. しかし, 風洞実験では0.64となり値が小さくなった. このことは, 風洞内に大きな渦が存在しないことが一因として考えられる.

パスキル図における σ_z は安定度によって非常に異なり, 簡単な直線には乗らないため比較しにくい, 風洞実験で得られた σ_z のX方向の変化は, パスキル図の一番安定な場合の曲線と似た傾向であった.

これら(i)~(iii)の比較から風洞では大きなスケールの渦が存在しないことや, 風速変動量が弱いこともあって, 野外よりかなり拡散が弱められる傾向が現われた. しかし, このことは大気汚染を考える上では安全側に傾いていることを意味する.

(2) 塀がある時の濃度

図6(a), (b)に塀がない場合と, 排出源から40cmに塀が置かれた場合の鉛直濃度分布を載せた.

塀を置いた場合, 塀の前の鉛直濃度分布は, 塀がない時とあまり変わらないが, 後方では濃度の最大値がかなり高い位置に出現する. この時排出源と塀との距離が遠いほど最大値の値は小さくなるが, その位置が床面から, さらに上方へ持ち上げられる傾向にある. これに対

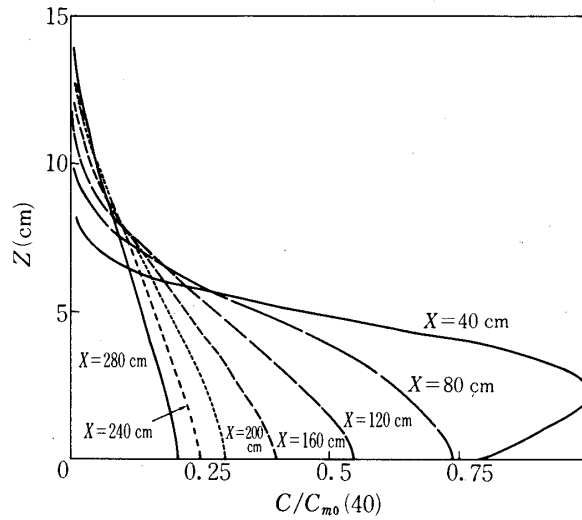


図6(a) 鉛直濃度分布塀なし $C_m(40)$: $X = 40$ cm での最大濃度

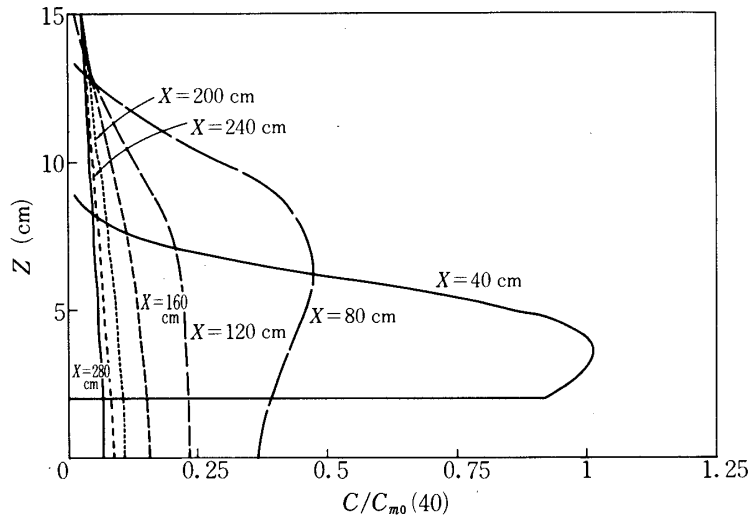


図6(b) 鉛直濃度分布塀あり, $L = 40$ cm, $C_{m0}(40)$: 塀がない時の $X = 40$ cm での最大濃度

して塀のない場合には、 $X = 80$ cm の所で最大値が床面に接し、以後床面をほう形となる。この現象は流れ方向の風速変動量が塀のない場合には床面に最大値が現われ、ある場合は、塀の後方で、やはり最大値が上方に出現するのと似ている。

次に、塀の有無や、塀の位置によってどれだけ拡散効果があるかを調べるために、床面上での最大濃度の比較をおこなう。図7は最大着地濃度の流れ方向に対する変化を表わしたも

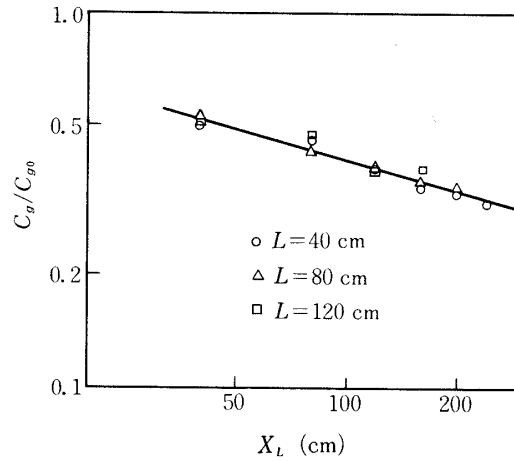


図7 最大着地濃度と塀からの距離の関係
 C_{g0} : 塀がない時の最大着地濃度

のである。この時の濃度はその地点での塀のない場合の濃度で無次元化してある。また、風速分布の時と同様、塀の位置を基準点に取ることとする。この図より塀を基準に見れば、塀の位置にかかわらず、すべての点は一つの直線に乗ることが明らかである。この直線は $C_g/C_{g0} = \alpha (X_L/H_L)^n$ の簡単な式に乗る。 X_L は塀からの距離、 H_L は塀の高さである。ここで n の意味を考える。 n が零の時は、塀によってある程度拡散された物質は、以後平板上での拡散と同じ割合で薄まる。塀があれば n は負で n が小さくなればなるほど、塀による拡

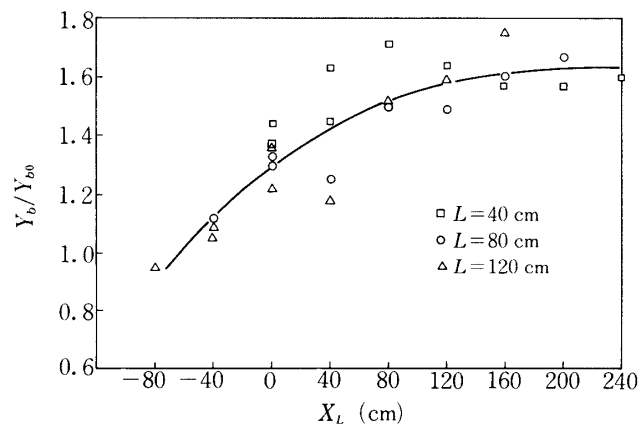


図8(a) 最大濃度の1/10になる巾とフェンスからの距離の関係 (Y方向)

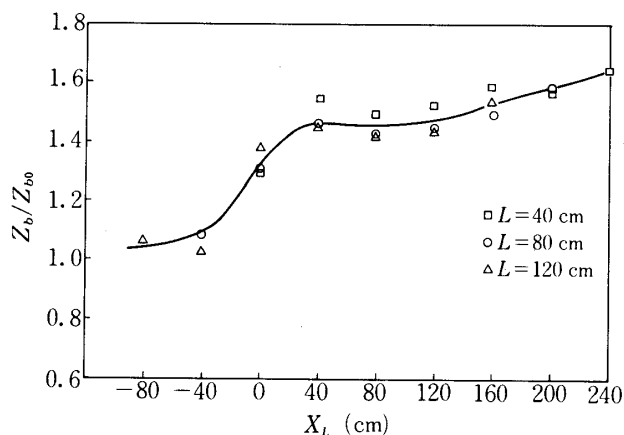


図8(b) 最大濃度の1/10になる高さとの距離の関係 (Z方向)

散能力が風下方向にも持続される。今回の実験では、 n はほぼ -0.25 の値を示した。

塀の存在というものは、塀がない場合の濃度を何パーセントか減少させる効果を持ち、その減少率は塀からの距離によって決まってくる。すなわち、塀から40cm離れば、その地点での塀がない時の濃度の約50%になり、80cm離れば約45%となる。

次にY方向、Z方向の拡散巾と風下距離との関係を調べる。この時も塀の置かれた場所を基準点とする。拡散巾としては、両方向とも、最大濃度の10分の1になる長さを取ることにする。それぞれの拡散巾は塀がない場合の拡散巾で無次元化してある。図8(a)はY方向の拡散巾と流れ方向の変化を示したものである。この図より塀の前方ではあまり平板とは変わらないが、塀の頂部や $X_L = 40$ cm では、かなり広がりが見られる。しかし $X_L = 40$ cm 以降は、平板の約1.6倍で、ほぼ一定の値を示した。排出源と塀の間隔の差による違いは値にかなりのばらつきが見られたため、明確にはわからなかった。又、拡散巾は高さによって異なり床面上での広がり巾は大きくなる傾向がある。そのため、最大濃度の高さを決定しにくい、 $X_L = 40$ cm, 80 cm あたりでは値に不確定の要素が含まれる。

Z方向の拡散巾とX方向の関係は図8(b)に示されている。これより、Y方向の場合に比較して値のばらつきがかなり小さい事がわかる。又、排出源と塀の距離によるちがいはほとんど見られない。塀後方では塀が存在しない時の値の約1.5倍程度の拡散巾を持ち、ゆるやかにその値が大きくなっている。すなわち、広がっているのが見られる。結局、Y方向も、Z方向も塀によってかなり強制的に拡散されるが、その後はあまり平板の場合と変わらないようである。

(3) 塀と林による拡散効果の比較

最後に塀と林の6ケースについての濃度の比較をおこない、効果的拡散方法を検討する。

○塀がある場合 (塀高, 40 cm)

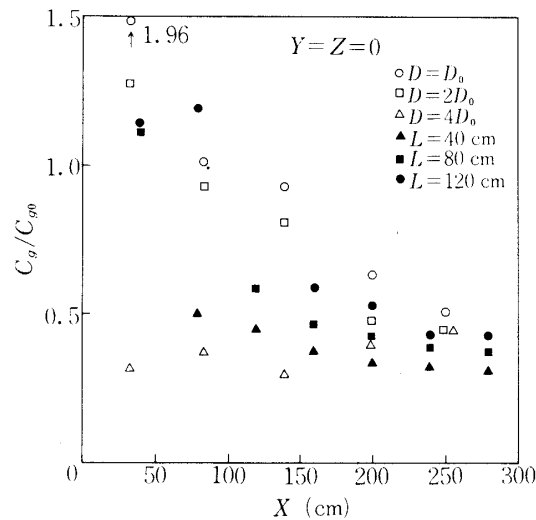


図9 塀と林による着地濃度の比較

塀の位置は 40 cm , 80 cm , 120 cm の 3 種類

○ 林がある場合 (林高, 7.5 cm)

林の密度は 64 cm^2 に 1 本, 2 本, 4 本の 3 種類

これを D_0 , $2D_0$, $4D_0$ とあらわす

比較の方法は, 人間生活の場に密接している着地濃度に着目し, 固定した測定点の濃度を調べる. 上記 6 ケースの着地最大濃度と流れ方向の変化を示したのが図 9 である. 始めに塀のみに注目すると, 全体的に塀の位置が排出源に近いほど濃度が低くなる傾向が見られる. しかし測定点が遠くなればなるほど塀の位置による差はなくなっている. ここで特徴的なのは, 塀の前後で濃度が急激に変化することである.

それに比べて, 林の場合には徐々に濃度が下がってゆく. ただし木の密度が一番高い場合には濃度が極端に低いが, これは拡散物質が全体的に林の上方へ押し上げられるためと思われる. しかし林の場合には密度が高いほど拡散効果が現われた.

塀と林の 6 ケースについては距離が小さい所では差が顕著に現われ, 塀の位置が 40 cm の時や, 一番密度の高い林の場合が効果的であったが, 遠方, たとえば $X = 250 \text{ cm}$ では, ほとんど同じ値を示した. $X = 250 \text{ cm}$ より後方ではどのように変化してゆくのか測定不可能なため, 調べられなかった.

5. ま と め

風洞実験の結果は常に実際の自然現象と照らし合わせる必要がある. 今回の実験では, 平均風速はほぼ自然現象を再現し, 風速変動はやや弱いという結果になっている. 従って, 物質の拡散については, 野外より拡散されにくい. 塀による拡散能力は塀の位置を基準に取れば, 排出源と塀の間隔にはよらず, 塀と測定点の距離によって決められる. このことにより, 任意な塀の位置における風下方向の着地濃度の推定が可能となり, 又逆に, ある地点の濃度を

何パーセントか薄めるのに必要な塀の位置の計算が可能となる。

林と塀の拡散効果を比較してみると、遮へい物の近くから低い濃度が必要な場合は、塀か密度の高い林がよい。しかし、ある程度離れた地点の濃度を薄めるには、塀、林、いずれの方法でもたいして違いがない。林の場合は、植物による汚染物質の変質や沈降を促進させる可能性を持っているし、また、見た目にも美しい。従って、塀よりもすぐれていると思われる。

この風洞実験の結果から、実際の例について推定を行ってみよう。縮尺を1/100とすると、塀の高さ4m、排出源高さ4m、塀から排出源までの距離40~120mとなつて、実際に近い値となる。この時、塀からの距離50mでは、塀のない時に比べて約0.5倍、100mでは0.65倍、200mでは0.9倍といった地表濃度の低下が見られる。200m以上では、塀があってもなくてもほとんど違いがない。一方、汚染源から一定の距離の地点の濃度については、塀が汚染源に近い程有効である。汚染源から200mの点について言えば、塀が汚染源から40cmのとき、塀のない時の0.5、80mのとき0.67、120mのとき0.84となっている。

1978年1月12日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] 佐藤 浩, 恩田善雄, 斉藤隆雄, 1973 : 大気乱流の風洞実験, 東大宇宙航空研究所報告, 9-2 (C) 675-687
- [2] 佐藤 浩, 恩田善雄, 本橋龍郎, 作山喜秋, 1978 : 空港周辺大気汚染の風洞実験 東大宇宙航空研究所報告, 14-1 (C) 469-482
- [3] Fuquay, J. J., Simpson, C. L. and Hinds, W. T., 1964 : Prediction of environmental exposures from sources near the ground based on Hanford experimental data. J. Appl. Meteor., 3 761-770
- [4] Pasquill, F., 1961 : The estimation of windborne material. Meteorological Magazine, 90, 33-49
- [5] Gifford, F. A. 1960 : Atmospheric dispersion calculations using the generalized Gaussian plume model. Nuclear Safety, 2, 56-59