

空港周辺大気汚染の風洞実験 —— 林による拡散効果

佐藤 浩・恩田 善雄・本橋 龍郎・作山 喜秋

1. はしがき

航空機による大気汚染は、航空機が物をもやして飛んでいる限り必ず存在する。汚染の形態としてはいろいろあるが、飛行高度による分類が便利である。

1.1 高々度飛行

成層圏における汚染物質の排出と滞留は、全地球的規模の課題である。それによってオゾン層が破壊され、地上における紫外線強度の増大や全地球的な気象変化が予想されている。

1.2 低高度飛行

空港付近における飛行は、地域的規模の汚染をひきおこす。則ち、窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素などの濃度上昇、また光化学反応を含む化学反応による有害物質の生成と輸送が問題であって、光化学スモッグが、航空機によるとの説もなされている。

1.3 空港発着時

離着陸、地上走行、地上テストなどのときのように、低高度から排出される汚染物質は、空港周辺に局限された影響をおよぼす。その好例は大阪空港である。周辺の住民は排出ガスによって健康障害を受けている。

これらのうち今回報告されるのは、第3項に関連したもので、住宅と近接した空港からの汚染物質による被害を何らかの方法で軽減する手段を見出そうというものである。

大気汚染の汚染源として明白なものは、巨大コンビナートである。そこからは、数多くの種類の有害物質が排出される。対策として最上のもは排出を無くすることであるが、それが100%成功しなければ次善の策としては有害物質を排出のあとで取除くか人間から遠い所へ捨てることであろう。その機能を果たすものの一つとして林が考えられる。即ち、汚染源を林で取囲んで上述の効果をあげようというアイデアである。これは空港についても応用できる。林には2種類の作用が期待される。その一つは、林があることによって強い乱れを作って、汚染物質を高空へ拡散することであり、もう一つは、林に入ってきた汚染物質が枝や葉に沈着しまた植物の作用で変質して沈降または無害化されることである。後者については複雑なプロセスが予想され、個々の汚染物質につき、またいろいろな種類の木についての研究が必要であるが、前者については比較的容易に一般的結論が得られそうである。たまたま大阪空港周辺に植樹をする案が検討されていることでもあり、林の効果を風洞実験によって調べることにした。

2. 基礎的考察

風洞において自然現象を模擬しようとするとき、最も基本的な問題は相似性である。幾何学的相似性が力学的相似性となるためには、レイノルズ数のような無次元数が一致する必要がある。しかし風洞実験は縮尺実験でありレイノルズ数の一致を期待することはできない。しかれば、風洞実験の結果はどれくらい実際に近いのであろうか。この疑問に定量的な答を出すことは不可能であるが、我々の立場は次の通りである。

風洞実験によって我々が得るものは自然の“かけら”についての知識である。同じ空気を使い、幾何学的には似た実験をしている以上全く似ても似つかない結果が得られることはない。このことは、計算機実験との大きなちがいである。しかしこのかけらを総合して全体の自然の姿を読みとるには、いささかの技術が必要である。まず実験のいろいろなパラメータを広範囲に変えて自然を“包み込む”ようにする。この範囲としては自然には全く起きないような場合をも含む。即ち自然は流体力学的に可能ないろいろな場合のうちの特殊な例にすぎないを考える。次には可能な限り実測と比較して確実な部分をかためる。実測はしばしば不完全であり、精度が低い。風洞実験の結果が実測によって部分的にでも“実証”されれば真実味が増してくる。最後には流れを十分に理解した上での外挿による推定である。この作業はいささかの任意性を含んでいるが止むをえない。この部分が風洞実験者の腕の見せどころとなる。

このような考え方で計画された実験は次の通りである。

1. 平均流速の高度方向への分布を広範囲に変える。

自然風は地上の障害物や温度によって大きく変化するから風洞でもそれに対応した実験をする必要がある。温度による影響は直接的には流速分布の変化にあらわれ、拡散そのものには間接的と考えて、速度分布の中に含むことにする。

2. 平均流と乱れを詳細に測って実測と比較する。

林の周辺の流れについては実測結果が手に入るから、それと比較してみることができる。それによって風洞実験の真実性が検証される。

3. 高空への拡散と地上濃度変化の測定

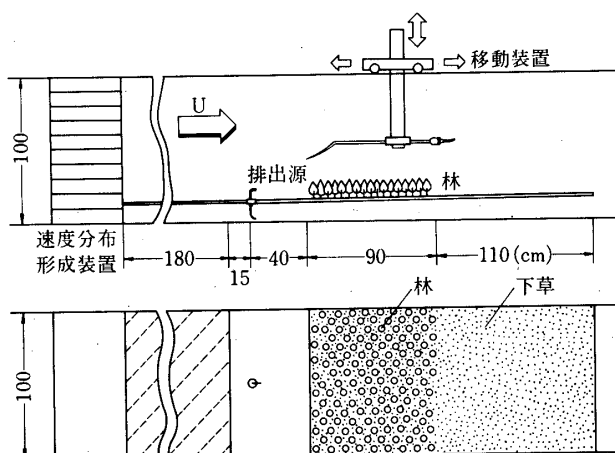
拡散に及ぼす林の効果の実測値はほとんど無いが、流れの相似性が保障されれば拡散測定の結果の真実性は高いであろう。

3. 実験装置

風洞： 使用したのは宇宙航空研究所の大気乱流風洞である。これは吹出形で断面1 m × 1 m、長さ5 mの測定部を持っている。

風速分布形成： 測定部の上流には任意の風速分布を作ることのできる分布形成装置がある。これは測定部断面を20ヶに分割し、その各部の空気抵抗が任意に変えられるようにしたものである。

詳細については、佐藤、恩田、齊藤、(1973) に述べられている。風速分布の地面付近の強い剪断を作るためには、測定部の床にダイヤ・ブロックというプラスチックの薄片を並べた。



第1図 実験装置

林模型： 林の配置を第1図に示す。

樹はプラスチック製で、高さ約7.5 cm、ひろがりの直径は約5 cmである。配置は千鳥状で、樹の間隔は約8 cmである。これは林としては疎林といえるであろう。実際の樹高が3.7 mならば、縮尺は1:50であり、樹高が4.5 mに対しては1:60となる。

1:50の時、樹密度は1アール当り10本となる。林を風が吹き抜けあるいは乗り越える場合に下草部分の抵抗は流れをきめるのに重要な因子である。

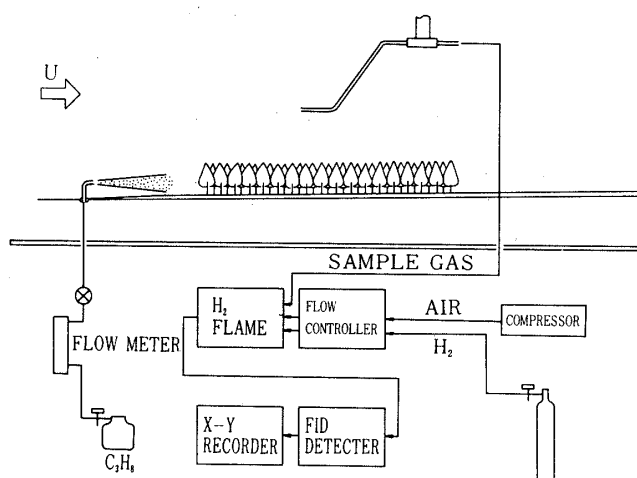
そこで、下草を模擬するためにプラスチックの人工芝を敷いた。第1図の点を打った部分がそれである。林の中の風速を2.5 m/sとするとレイノルズ数は、樹幹(3 mm)に対しては500、樹枝(1 mm)に対しては150で、このあたりでは抵抗係数はレイノルズ数に対してはさほど急激には変化しない。

速度測定： 速度は平均、変動とも熱線風速計によって測られた。速度のu成分(流れ方向)は一本の熱線で、w成分(上下方向)は二本の熱線をX字形に配置したもので測られた。その熱線風速計は第1図に示すように前後、上下に動かせるトラバース装置に乗せてある。

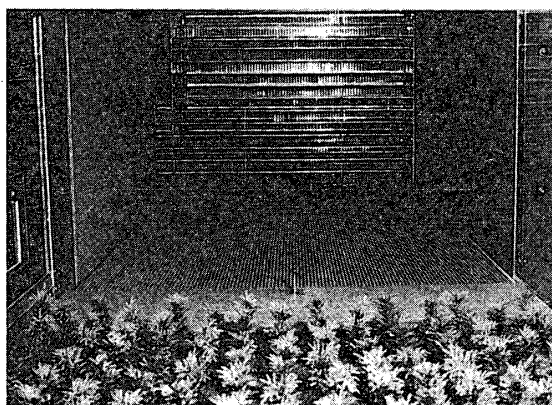
濃度測定： 使用した汚染物質はプロパンで、森の前方に突出したノズルからほぼその場所の風速で吹出す。吸込みパイプはトラバース装置に乗せてあり、小型ポンプで吸込まれたサンプルガスは水素炎で燃焼しそのイオン電流を測定する(FID デテクター)。

第2図はその概念図である。濃度とデテクター出力の直線性は測定された濃度範囲内では確認された。

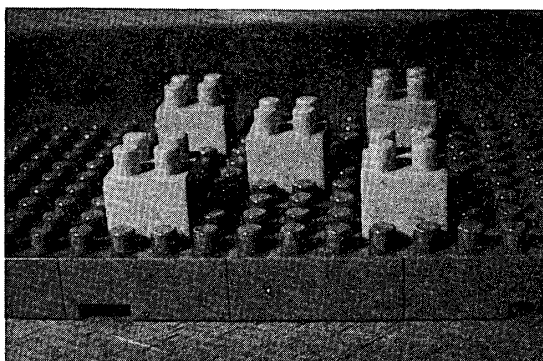
第3図は測定部を下流から見た写真で前面に速度分布形成装置が下方に林が見える。第4図は、地面におかれたプラスチック片で、第5図は樹の写真である。



第2図 濃度測定系



第3図 測定部を下流から見たところ。前方に見えるのは速度分布形成装置。下方に林がある。



第4図 粗さをつくるプラスチック・ブロック



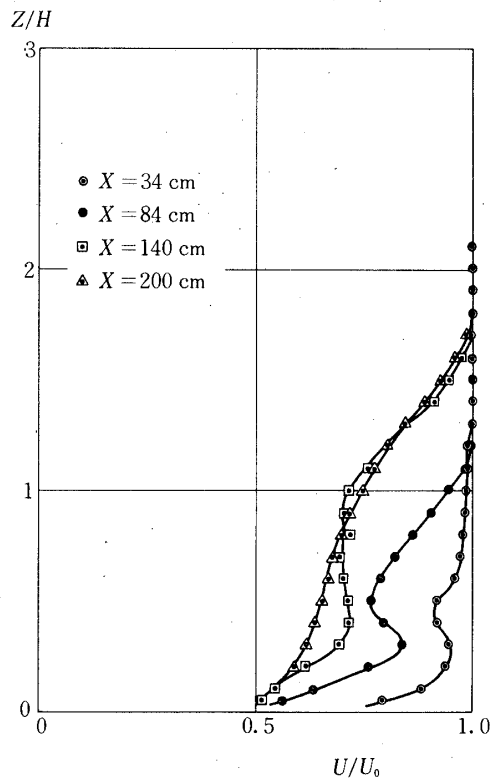
第5図 プラスチックの樹

4. 風速測定

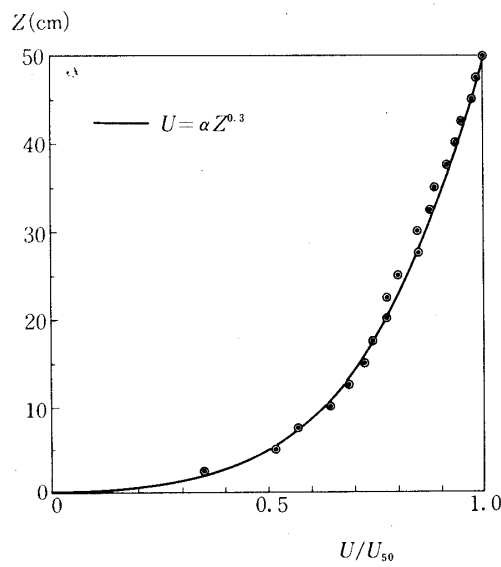
林が一樣流の中にあるときの平均風速の分布を第6図に示す。X=34 cm は林の直前で、薄い境界層が見られる。X=84 cm は林の中で、 $Z/H < 1$ で減速が、また $Z/H = 1$ での強い勾配があらわれる。更に森の直後の X=140 cm と X=200 cm では、ほぼ相似の分布となる。

一樣流は簡単で基礎的だが、実際の大气からのちがいが大きい。そこで速度分布として第7図に示したものを作って実験を行った。同図の中の実線は $U \sim Z^{0.3}$ という接地境界層形の分布を示す。点は実測値であって、ほぼ予定の分布が作られていることがわかる。この分布の風を用いたときの林における分布を第8図に示す。横軸は、 $U=5 \text{ m/s}$ を基準風速として無次元化されている。当然のことながら $Z/H < 1$ における減速は、はげしく、 $Z/H = 1$ における勾配が大きい。特に X=140 cm における分布は典型的なものであって後に述べるように実地の風の測定とよく一致している。

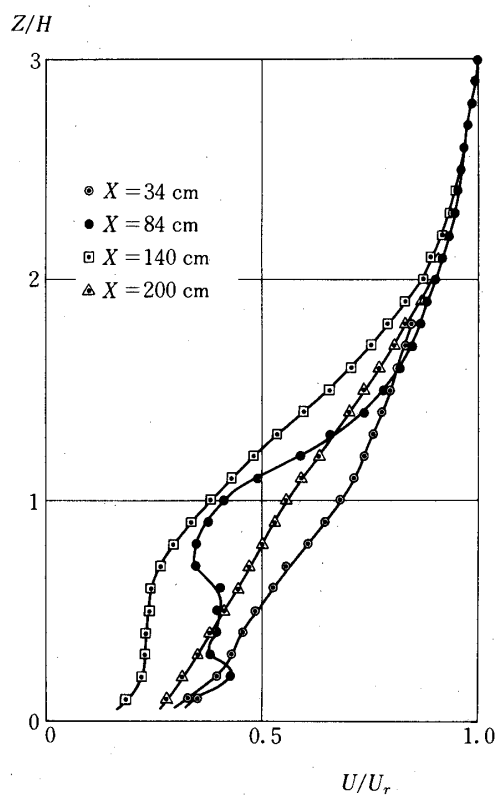
この場合の風速変動の測定例を第9図、第10図に掲げた。いずれの場所でも流れ方向の変動 $\sqrt{u^2}$ が、鉛直方向変動 $\sqrt{w^2}$ のほぼ2倍になっており、X=34 cm では最大値約6%



第6図 平均風速分布, 一樣流, $U_0 = 5$ m/s, $H = 7.5$ cm



第7図 境界層形風速分布



第8図 平均風速分布, 境界層流 $U_r = 5 \text{ m/s}$

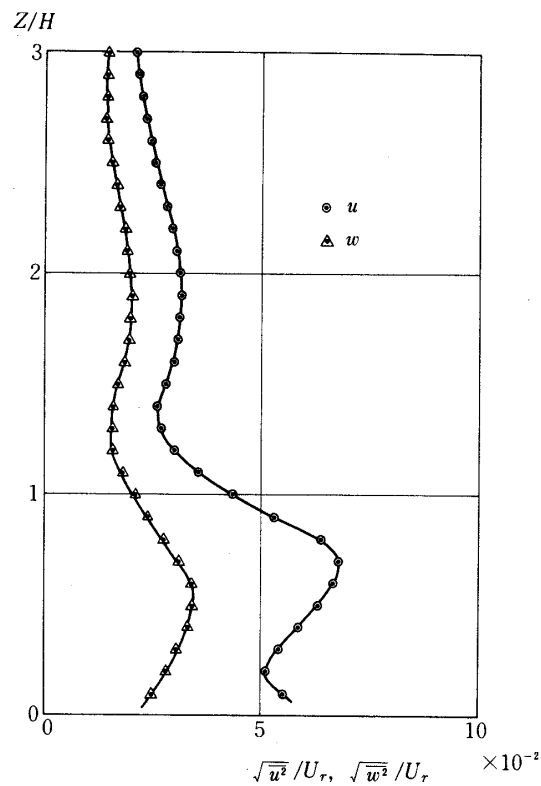
が、林梢のやや下にあらわれており、 $X = 140 \text{ cm}$ では、 $Z/H = 1.3$ ぐらいに最大がある。又、 $Z/H < 1$ における $\sqrt{w^2}$ の値はあまり大きくないから林を通り抜けてきた汚染物質の鉛直方向の拡散はさほど大きくないことが予想される。

5. 実測との比較

森林の内部、後方における風速や乱れの分布は防風林の設計のために、またとうもろこしのような作物の中の風は同化作用や花粉の移動に関連していろいろな実測結果がある。(Meroney 1968, 齊藤他, 1970, Seginer 他, 1976, Bill 他, 1976) しかしそれらは系統性を欠いていたり、上空の風の測定結果が無かったりして不完全なものが多い。ここでは建設省東北地方建設局(1975)の報告の中の秋田市中野における実測結果を利用する。

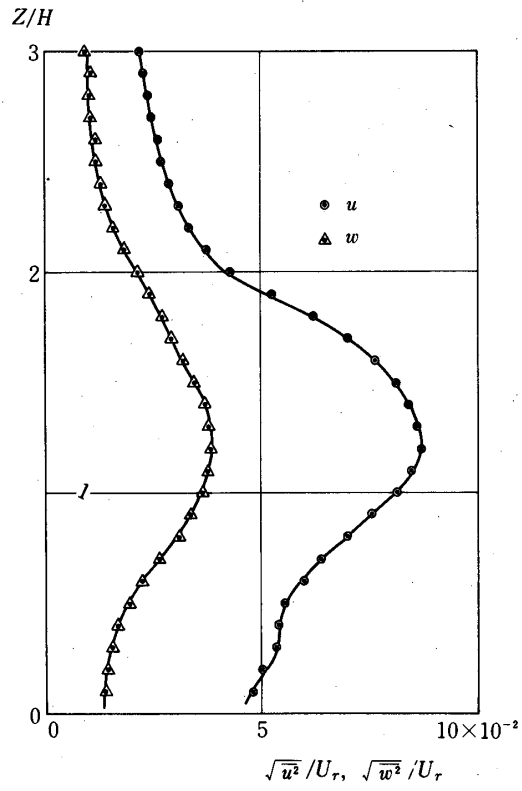
第11図は疎林(樹高4~5m, 1アール当り35~40本)におけるもので、風速は $Z = 7 \text{ m}$ の値で無次元化してある。また第12図は密林(樹高4~5m, 1アール当り80本)における結果で無次元化は、 $Z = 10 \text{ m}$ の風速で行われている。この測定は南北の海岸線に沿う松の防風林の中で行われ、海岸からの距離はそれぞれ500mと200mである。風はほぼ西風で海岸線に直角に吹いている。これら2つの図を見ると密林では、林の中の風速が低いが木の梢付近での風速分布の形は剝離流に特有の形をしていることがわかる。

このことは第8図の結果に近く、同様な無次元化で第12図に細線で入れられた風速実験の

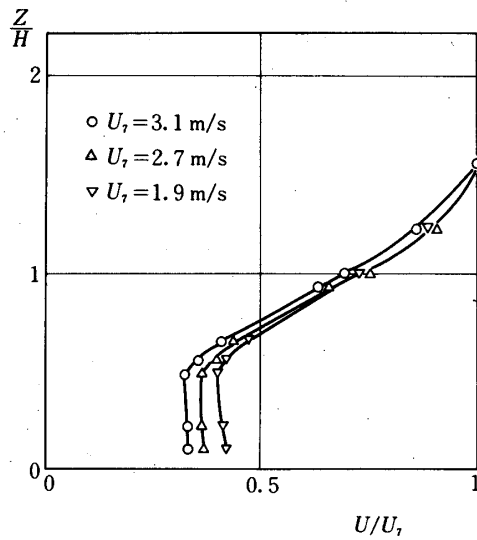
第9図 速度変動の強さ, $X = 34$ cm

結果(第8図, $X = 140$ cm)は, 実測とよく一致する. 風洞実験の樹高は7.5 cmで, 実測の約1/50に相当する. これから計算すると風洞実験は著しい疎林に対応しており, 実測に比べて林の中の風速が高いのは当然のことである.

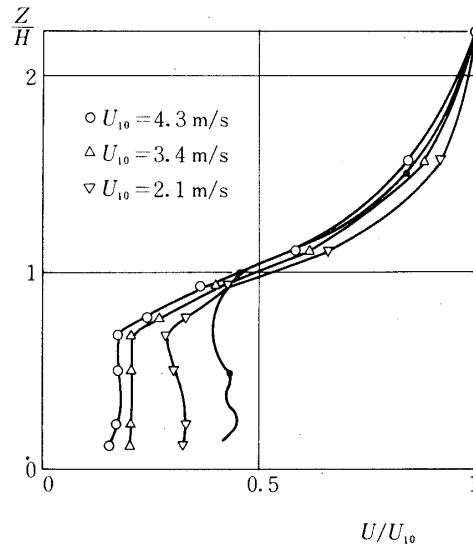
他の実測結果も定性的には第12図のようであって, 林の上の部分はほとんど普遍的な剝離流形, また林の中は木の疎密に応じた値となる. 勿論木の太枝の張り具合, 小枝や葉の張り具合, 下枝の有無, 下草の条件, 地面の起伏など数多くの差異があるがそれらは林としての抵抗の値としてくりこんでやると大体の見当がつくように見える.



第10図 速度変動の強さ, $X=140$ cm.



第11図 秋田市中野, 疎林, 平均風速分布
 $H=4 \sim 5$ m, 1アール当り 35~40本



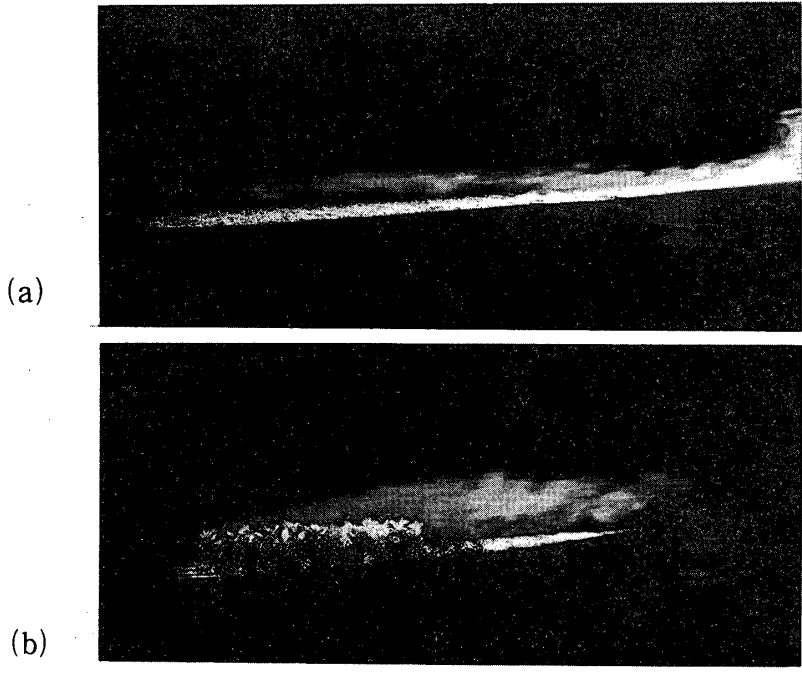
第12図 秋田市中野, 密林, 平均風速分布
 $H = 4 \sim 5$ m, 1アール当り80本

6. 濃度測定

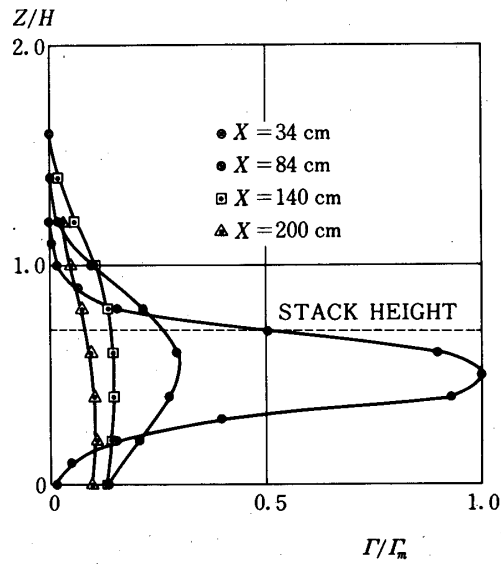
定量的な測定を行う前に大体的様子を見るために煙を出して撮ってみた写真が第13図である。(a)は林の無い場合で煙は低く地表をなめている。それに反して林のある(b)では煙は上方に持ちあげられて、広く拡散していることがはっきりとわかる。

濃度の定量的測定の例は第14図(林なし), と第15図(林あり)である。排出源はほぼ点源であるから水平方向の拡散もあるがこの例では測定は排出源のまっすぐ風下の断面において行われた。風速分布は第7図のような境界層形である。両図とも $X = 34$ cm における濃度の最大値で規格化されている。両方を比べて見ると $X = 34$ cm ではほとんどちがいが無いが $X = 84$ cm では林があると $Z/H = 1$ 付近に大きく平坦な分布があらわれあきらかに低高度 ($Z/H = 0.5$) 付近の濃度が減少していることがわかる。さらに $X = 140$ cm, 200 cm においても, $2 > Z/H > 1$ にかなり高い濃度があらわれ高空への拡散が如実に示されている。林の無い第14図では, 濃度分布は $Z/H \approx 0.5$ について上下対称であって, 特に高空への拡散がないことがわかる。

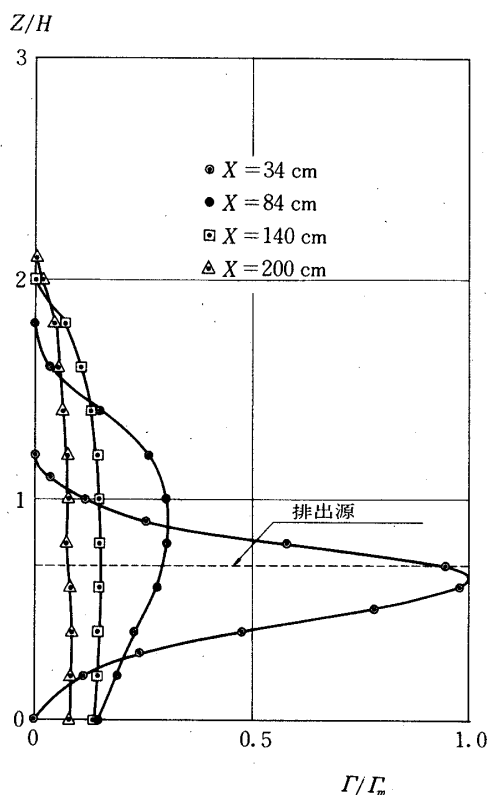
林のある場合と無い場合の直接の比較が第16図である。場所は林直後, $X = 140$ cm である。ここには風速分布が一樣の場合のデータも比較のために示されていて, 風速一樣で林のない場合の最大値で規格化されている。この場合には拡散はきわめて悪いが, 一方林の効果は, 著しく, 濃度の最大値は $Z/H \approx 1.6$ にまで持ち上げられ, 着地濃度も極めて低い。これは一樣流のときは乱れが弱くて地面の方への拡散が少い事と林梢付近の強い拡散能力によるものであるが, この一樣流についての結果はやや非現実的である。境界層形の場合にも林によって上方に拡散している有様がよくわかるが, 着地濃度の減少は20%ぐらいにしかすぎない。これは排出源から下方への拡散を林によって妨げることがむずかしいことを物語ってい



第13図 拡散煙写真, (a)林なし, (b)林あり, 流れは左から右



第14図 濃度分布, 境界層形速度分布, 林なし.
 Γ_m : $X = 34$ cm における最大値.



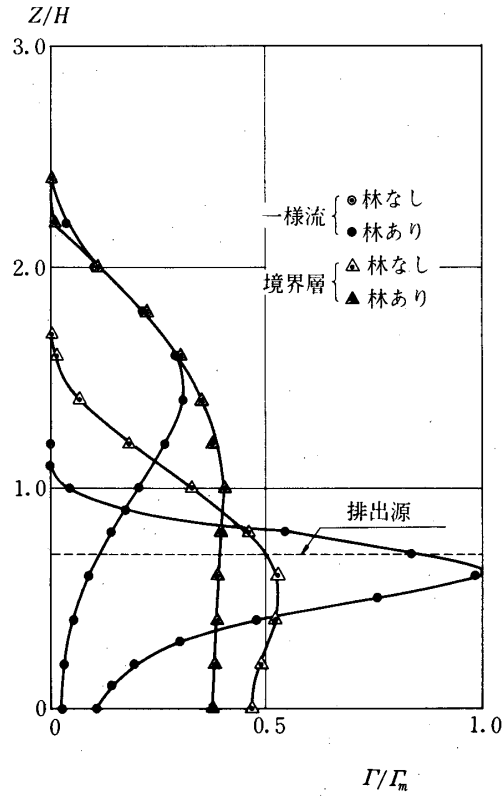
第15図 濃度分布, 境界層形速度分布, 林あり.
 Γ_m : $X=34$ cm における最大値.

る。

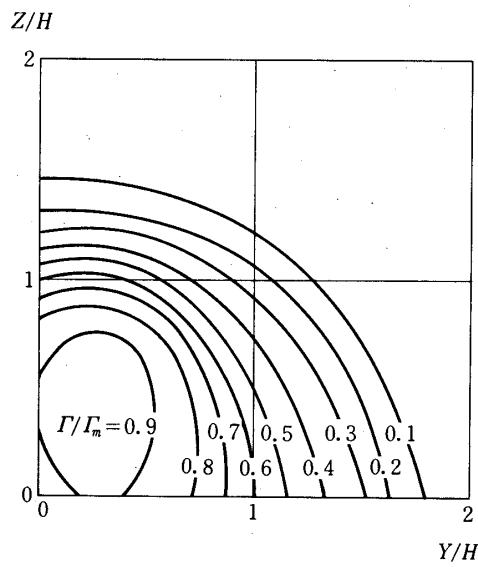
第17図は林のない場合の $X=140$ cmの断面における等濃度線で高濃度部は Z 方向に大きく拡散し低濃度部分はほぼ軸対称に拡散していることがわかる。着地濃度の風下方向への変化を示したものが第18図である。あらゆる X で林のある場合の方が、無い場合に比べて濃度が低いことがわかる。両方とも最大着地濃度は $X=110$ cmにおいてあらわれる。また、濃度減少は風下ほど大きく、 $X=200$ cmでは、ほぼ $1/2$ となっているが、これより風下の測定点がないのが残念である。 $X=34$ cmという林の前面における Z 方向の濃度分布を比べてみると林のある場合にはこの点においてすでに濃度が低くなっている。これは林の存在のため上流側での速度勾配の増大とそれに伴う強い乱れの発生によるもので、このことが風下の濃度減少に大きな寄与をしていると考えられる。

7. あとがき

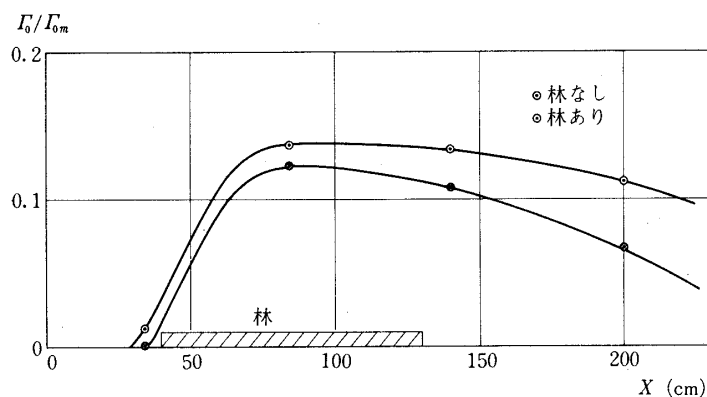
風洞の中のプラスチック製の木で作られた林のまわりの流れは、風の分布が境界層形に作られたときは野外実測の結果ときわめて近いことがわかった。ただし比較は平均風速だけなので、変動についての系統的な実測がのぞまれる。さらに拡散に重要な役割を持つエネルギー・スペクトルは風洞においてもまだ十分に計測されておらず、今後の問題として残されて



第16図 いろいろな条件における濃度分布
 $X = 140 \text{ cm}$, $\Gamma_m : X = 34 \text{ cm}$ における
 一様流, 林なしの場合の最大値



第17図 等濃度線, 境界層形速度分布, 林なし $X = 140 \text{ cm}$



第18図 着地濃度の流れ方向への変化
境界層形速度分布. Γ_m : 林なしのときの
 $X = 34 \text{ cm}$ における濃度の最大値

いる。

濃度測定の結果から林による強い上方拡散が確認されたが、着地濃度については高々1/2に低下する程度にしかならなかった。実験はさらに線排出源は、面排出源についても行われる必要がある。また林の中での汚染物質の吸収、沈着は着地濃度減少のための重要な因子であり、その効果の適切な見積りが要望される。

1978年1月9日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] Bill, R. G., Allen, L. H., Audunson, T., Gebhart, B. and Lemon, E. 1976
Turbulent transport within and above a maize canopy. *Boundary Layer Meteorology* 10 199-220
- [2] 建設省東北地方建設局, 1975. 緩衝緑地整備計画調査報告書.
- [3] Meroney, R. N. 1968, Characteristics of wind and turbulence in and above model forests. *J. Appl. Meteorology* 7 780-788.
- [4] 斉藤隆幸, 永井良典, 磯部誠之, 堀部淑子, 1970, 植物群落内部の気流の乱れについて. *農業気象* 25 205-214
- [5] 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. 第9巻, 第2号, 675-687.
- [6] Seginer, I., Mulhearn, P. J., Bradley, E. F. and Finnigan, J. J. 1976 Turbulent flow in a model plant canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 10 423-453