

拡散実験データに基づく水平方向 拡散幅 σ_y についての解析*

岡本 真一 塩沢 清茂**

要旨

拡散実験データに基づき、水平方向拡散幅 σ_y について解析を行なった。 σ_y は、風速と地面粗度に依存し、温位勾配と放出高度にはあまり影響されない。PG 線図は該当する大気安定度分類に対して、過小評価の傾向にある。

1. 緒言

大気中に放出された煙の濃度の推定に際して、重要なパラメータの一つとして、煙の拡散幅がある。Pasquill (1961) の提案した線図を Gifford (1961) が修正したものが Pasquill-Gifford (PG) 線図と呼ばれ、Turner (1967) の Workbook に採用されたことから、広く利用されるようになった。その後、各地で行なわれた拡散実験などに基づいて、各種の線図が提案されており、Gifford (1976) などがその比較検討を行なっている。これらの研究の多くは、Prarie Grass, Green Glow, St. Louis 実験などに基礎を置いている。わが国においても、このような実験データの集積がすすんでいるが、あまり統一的な処理はなされていない。今回は、内外の拡散実験データ約 900 例を利用して、横風方向の拡散幅 σ_y に関して解析を行なったので、この結果について報告する。

2. 拡散実験における拡散幅の計算方法

地上捕集点における濃度観測値から拡散幅 σ_y を求める方法はいくつかあり、一般に、1960年代までは 2 次モーメント (分散) の平方根として計算している場合が多い。1970年以降の報文では、正規分布を仮定して簡単に計算している例が多い。ここでは、次に示す 4 種類の方

法を使用して、 σ_y 計算値の比較を行なった。このうち (ii)~(iv) は正規分布の性質を利用したものである。

(i) 平均値を中心とする 2 次モーメントを計算する方法。

$$\sigma_y^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(y-\bar{y})^2 dy}{\int_{-\infty}^{\infty} C dy} \quad (1)$$

(ii) 横風方向に積分したトレーサー全量の 95% が $\bar{y} \pm 2\sigma_y$ の間に含まれるとして、 σ_y を計算する方法。Heimback (1975) などに見られる。

(iii) 最大濃度 C_p の 10% 濃度となる地点の間隔が $4.3\sigma_y$ の距離に相当するとして、 σ_y を計算する方法。Peterson (1974) などに見られる。

(iv) 横風方向へ積分した濃度 CIC と、最大濃度 C_p の比が $\sqrt{2\pi}\sigma_y$ になるとして、 σ_y を計算する方法。Ferber (1973) などに見られる。

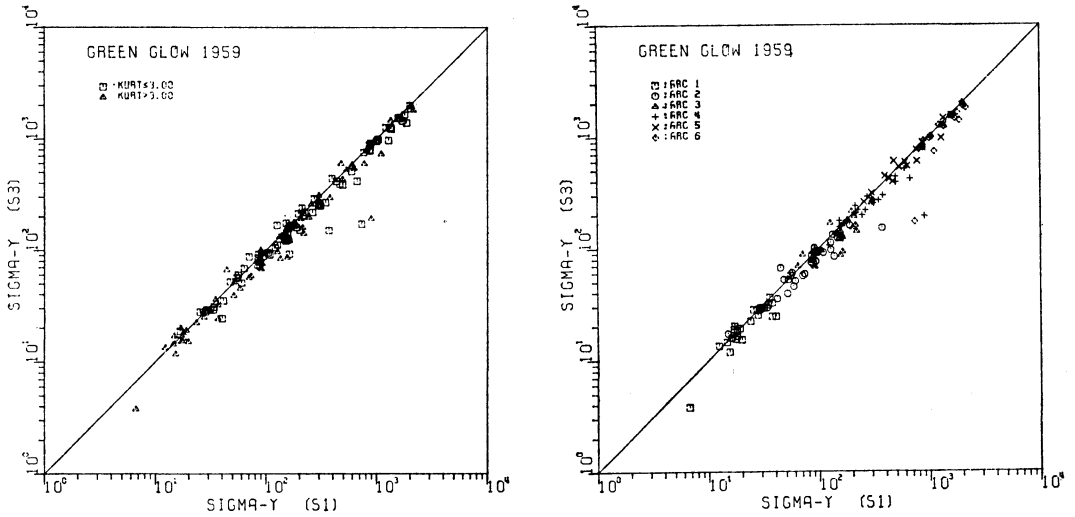
$$CIC = \int_{-\infty}^{\infty} C dy \quad (2)$$

Green Glow と東京タワーの拡散実験、それに Conemaugh 発電所の煙流観測データを使用して、上記 4 通りの方法で σ_y を計算した。

2 次モーメントから計算する方法 (S1) と最大濃度の 10% 地点間の距離から計算する方法 (S3) の比較を第 1 図に示す。この図より、尖鋭度別、アーク (風下距離) 別にプロットを分けても、S1 と S3 の相関関係に大きな差は見られない。測定点間の密度が高く、濃度分布の両端までのデータのある Green Glow と Conemaugh のデータでは方法 (i) と方法 (ii) から求まる σ_y の相関係数が最も高いが、東京タワーのデータについては方

* An analysis on the horizontal spread σ_y based on the diffusion experiments.

** Shin'ichi Okamoto and Kiyoshige Shiozawa,
早稲田大学理工学部。
—1979年8月10日受領—
—1979年11月13日受理—



第1図 Green Glow 拡散実験データによる拡散幅計算方法の比較. S1 は平均値回りの2次モーメントの平方根として求めた σ_y の値, S3 は最大濃度の10%濃度となる2地点間の距離より正規分布を仮定して求めた σ_y の値, 尖鋭度別および風下距離アーク別 (単位: m).

法(i)と方法(ii)の相関係数が最も低くなっている。

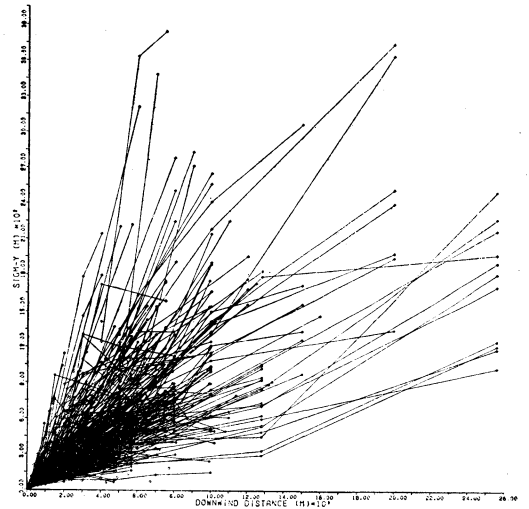
濃度分布の両端までデータが得られている場合には、方法(i)がよいと思われる。多くのトレーサー実験では、捕集網の密度が疎であったり、トレーサーの一部が捕集網からはずれるなど、不完全な実験データしか得られない場合が見られ、このような場合に補間あるいは外挿をせずに方法(i)を用いることは好ましくないが、これを計算機内で客観的に処理することは難しい。

方法(i)~(iv)より求まる σ_y の値を比較すれば、バラツキは見られるが、あまり大きな差はないので、どれを使用してもよいと思われる。したがって、以後の解析に利用する σ_y の値は各報文中に記載されているものをそのまま採用した。また、トレーサー濃度のみが記載されているものについては、最も簡単な方法(iii)により σ_y を求めた。

3. 解析方法

3.1. 風下距離の補間

多くの報文中に見られるように、拡散幅の大小を PG (Pasquill-Gifford) 線図などの σ_y-x (風下距離) 線図上で考えると、風下距離に伴う σ_y の増加が支配的であるために、大気安定度などのパラメータの影響が把握し難い場合がある。したがって、十分なデータが得られれば、同一風下距離における σ_y と気象条件などのパラメ



第2図 拡散幅 σ_y と風下距離の関係。

ータを比較することが望ましい。

ここでは、風下距離を一定にとり、各風下距離における σ_y を補間法により推定し、解析を行なった。補間の方法としては、第2図より風下距離 20 km 程度まではほぼ直線とみなせることから、線形補間を使用した。ただし、測定範囲の両端より外側への外挿はせず、風下距離 10 km 未満のデータについてはどちらかの弧状測定

網から 2.5 km 以内にあるもののみを採用した。

3.2. 時間補正

拡散幅は、捕集時間あるいは放出時間によって変化する。一般的には、捕集時間の比のべき乗で増加するモデルを使用する機会が多い (Gifford, 1975)。

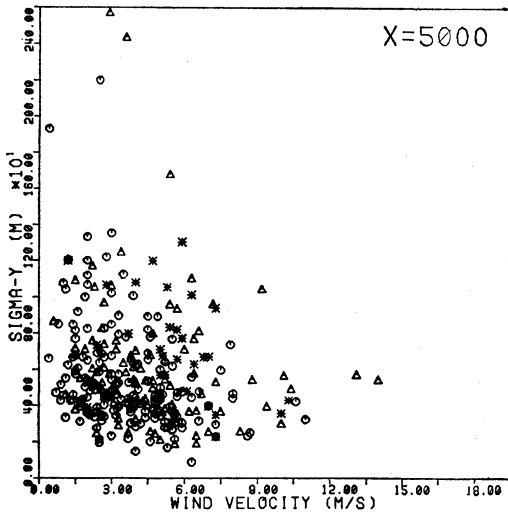
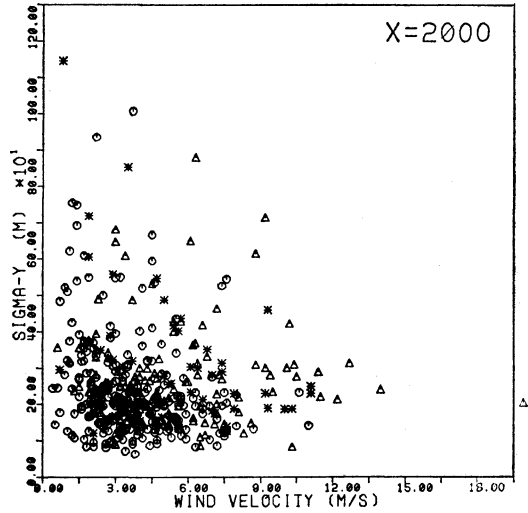
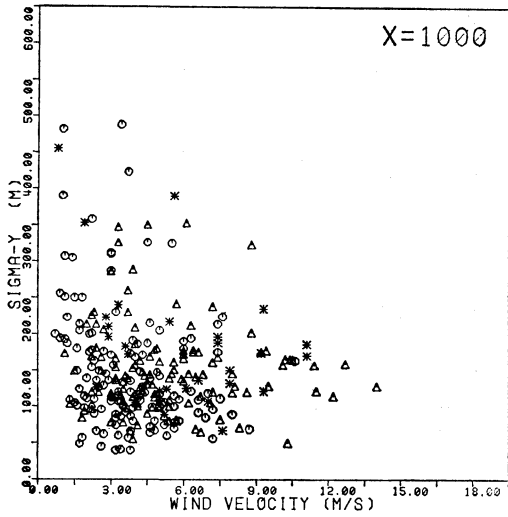
$$\sigma_{yA}/\sigma_{yB}=(t_A/t_B)^p \quad (3)$$

ここで、 σ_{yA} は捕集時間 t_A における拡散幅である。

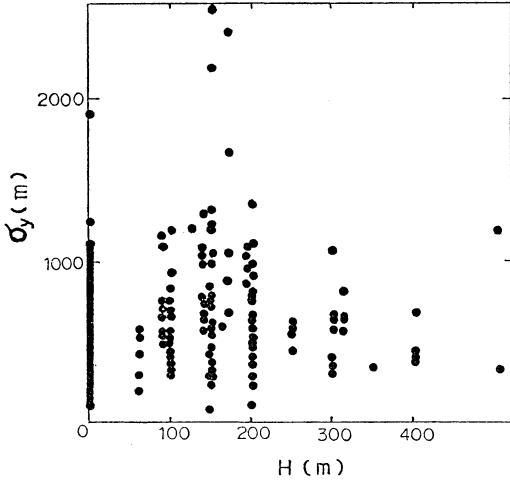
最高濃度についての時間比率のべき乗の係数は、Stewart (1958) の 1/5 から日野 (1968) の 1/2 の範囲にある。また、拡散実験結果から求められた係数 p は約 20~120 分の範囲で 0.2~0.3 であることを、Hosker (1974)、Heimback (1975) などが報告している。

ここでは、これらの報告に基づいて、平均的な係数 p の値として 0.25 を採用した。

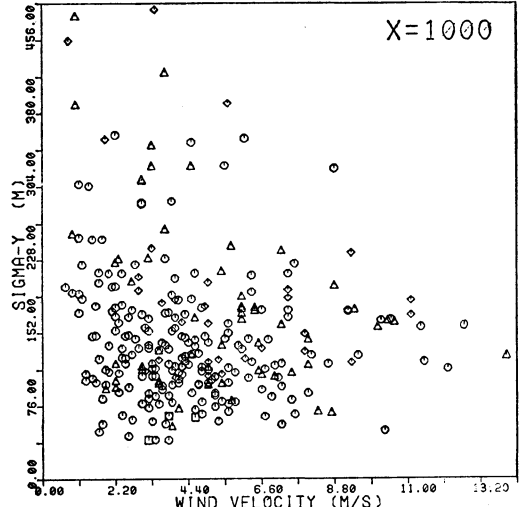
放出時間 T_D と捕集時間 t の関係については、Sakuraba (1970) などに述べられている。拡散実験では、一定時間放出して全量を捕集した場合と捕集開始前からトレーサーの噴霧を続けて一定時間の捕集を行なった場合の 2 種類があるが、ここでは同じ結果を与えるものと仮定して、一率に処理する。すなわち、トレーサーを 30 分噴霧して十分に長い捕集時間をとったデータも、十分に長い噴霧時間に対して 30 分間の捕集を行なって得られたデータも、同じように式 (3) の t_A は 30 分と仮定して、1 時間 (t_B) に相当する拡散幅 σ_{yB} を推定した。



第 3 図 風下距離 1000, 2000, 5000m における拡散幅 σ_y と風速の関係 (○: $d\theta/dz > 0$ or $R_i > 0$ (安定), △: $d\theta/dz \leq 0$ or $R_i \leq 0$ (不安定), *: 温位勾配不明)。



第4図 風下距離5000mにおける拡散幅 σ_y と放出高度 H の関係。



第5図 風下距離1000mにおける拡散幅 σ_y と地表面の状態との関係 (Δ :市街地, \diamond :近郊, \circ :平坦地, \square :起伏の大きい地域).

4. 解析結果

風下距離ごとに補間した拡散幅をもとに、各気象パラメータなどの関係について解析を行なった。拡散幅は式(3)により、すべて捕集時間1時間に相当する値に換算した。ここで使用している拡散実験は、47地区(プロジェクトの異なるものは同一地域でも別々に計数した場合)で行なわれたものであり、放出回数の合計は902回である。

4.1. 風速, 温位勾配との関係

風下距離1, 2, 5km 地点における σ_y と風速の関係を図3に示す。この結果から、風が弱くなるほど σ_y は大きくなり、かつバラツキも大きくなる傾向が見られる。この関係は、林(1976)などに見られる風速と風向変動幅 σ_θ の関係によく似ていることがわかる。また、この図3では、温位勾配によってプロットの記号を分けて示してあるが、あまり明確な差は見られない。

4.2. 放出高度, 地面粗度との関係

風下距離1~5kmの範囲では、放出高度による差はほとんど見られない。ここで、放出高度と σ_y の関係についての一例を図4に示す。近距離(1~1.5km)では、強風時(約8m/sec以上)で放出高度の低い場合に σ_y が大きくなる傾向が見られるが、全体にデータのバラツキが大きく、明確な相関関係は認められない(村上, 1979)。

地表面の状態によって層別した拡散幅と風速の関係を図5に示す。地表面の状態は次のように分類した。

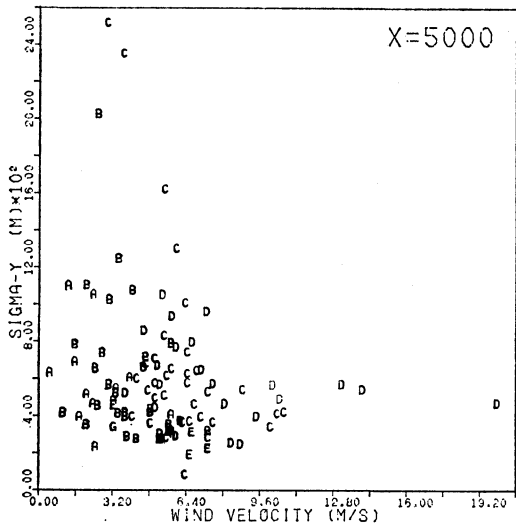
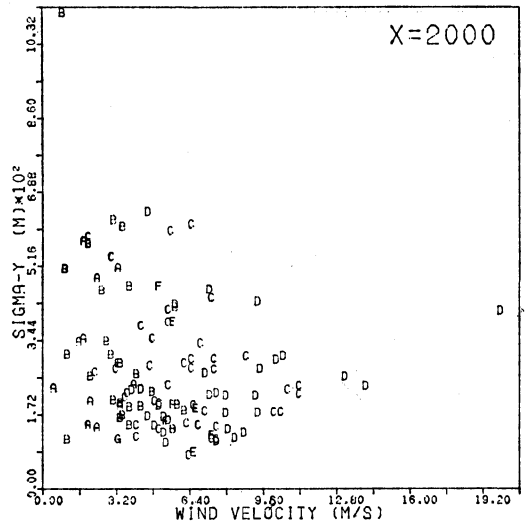
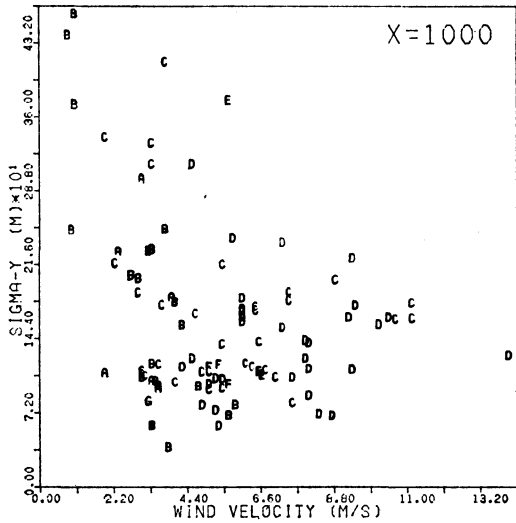
- (i) 市街地(大都市)
- (ii) 近郊(小中都市, 大都市の近郊)
- (iii) 平坦地
- (iv) 起伏の大きい地域

市街地では、すべての風下距離において平坦地より σ_y が大きくなっている。起伏の大きい地域では必ずしも σ_y は大きくないが、これは煙が谷に沿って流れる場合、両側の山にさえぎられて横方向へ拡散しないためであろうと考えられる。ここに示した例では、起伏の大きい地域での実験回数が少ないので、断定することはできないが、 σ_y の値にバラツキが大きいことも特徴の一つである。

4.3. Pasquill 安定度との関係

日射量, 雲量, 風速から求められる Pasquill 安定度別のプロットにより、拡散幅と風速の関係を示した結果が図6である。この図6では、A-B, C-Dなどの中間階級については、便宜的にそれぞれ不安定側の階級の記号で示している。Pasquill 分類表の空白欄はG階級として扱った。また、横軸の風速は主軸高度または放出高度の値であるが、Pasquill 安定度は地上風から求めている。

拡散幅がPG線図に従うと仮定すれば、強風側は大部分がDとなり、弱風側ではA~Gが σ_y の大きい順に層をなして現われることになる。しかし図6を見ると、



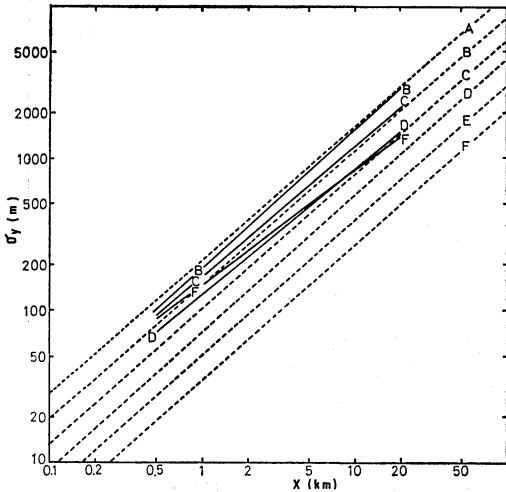
第6図 風下距離 1000, 2000, 5000m における拡散幅 σ_y と風速, Pasquill 安定度との関係。

風速の小さい順にA~Dが縦に並び、Pasquill 安定度で σ_y を区分できないことを示している。夜間のデータが少ないので、E~G階級については明確に安定度との関係を把握することはできないが、近距離ではA~C階級の σ_y とあまり変わらない大きな拡散幅となるようである。第6図の1000m, 2000m 地点では E, F階級の σ_y はD階級の値よりも大きい、5000m地点では E, F階級の σ_y は図中の下側に集まっており、安定時には σ_y の増加がゆるやかになると考えられる。

PG 線図は平坦地における地上源による 捕集時間数分

程度の実験に基づいて作製されたものであるから、そのままの形で広範囲に適用することは困難であるが、わが国では最も広く利用されている方法であり、この線図を使用する場合、どのような点に問題があるか把握することは重要であると考えられる。

そこで、Pasquill 安定度別に 0.5~20 km 地点における σ_y の平均値を求め、比較的データ数の多い B, C, D, F階級について、各平均値を通るようになめらかな線を引いた結果を第7図に示す。この結果を PG 線図と比較すると、1 km 付近ではすべて PG 線図のA~B



第7図 Pasquill 安定度分類表より求められた各安定度ごとの拡散幅 σ_y の平均値(実線)と PG 線図(破線)の比較。

階級に含まれ、20km 付近では各1階級程度不安定側にずらして使用した方がよいと思われる。安定時には、F階級のみ求められているが、近距離の σ_y は不安定側の値とあまり差がなく、20km 付近でもほぼ PG 線図のD階級と一致している。これは、Jülich 実験のデータに基づいて作られた Vogt (1977) の線図と非常によく似た結果となっている。

5. 結語

拡散幅 σ_y は、風下距離 20 km 程度の範囲内ではほぼ風下距離に比例して大きくなってゆく。ある一定の風下距離においては、風速が小さく、かつ地面粗度が大きいほど、 σ_y は大きくなる。しかし、温位勾配や放出高度にはあまり依存しないと思われる。

Pasquill の大気安定度分類表により安定度を設定し、PG 線図を使用して σ_y を推定する方法は、PG 線図が本来数分間の平均濃度に対応するものであることから予想されるように、全体に過小推定となるが、安定時にはこの傾向が顕著に現われる。

文献

Ferber, G.J. and R.J. List, 1973: Long-range

transport and diffusion experiment, NOAA, ARL.

Gifford, F.A., 1961: Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion, Nucl. Safety, 2, 4, 47-57.

———, 1975: Atmospheric diffusion models for environmental pollution applications, Chapter 2 of "Lectures on Air Poll. and Env. Impact Analysis", 35-58.

———, 1976: Turbulent diffusion-typing schemes: A review, Nucl. Safety, 17, 1, 68-86.

林 正康, 1976: 高さ50mで観測した大気乱流の性質, 公害, 11, 5, 54-67.

Heimback, Jr., J.A., et al., 1975: Dispersion from an elevated source over Colstrip, Montana, 68th APCA meeting paper #75-26.6

Hino, M., 1968: Maximum ground level concentration and sampling time, Atmos. Env., 2, 149-165.

Hosker, Jr., R.P., 1974: A comparison of estimation procedures for over-water plume dispersion, preprint Symp. Atmos. Diff. and Air Poll., 281-288.

村上俊一, 1979: 大気汚染濃度予測のためのシミュレーションモデル—大気拡散幅の推定について—, 早稲田大学修士論文.

Pasquill, F., 1961: The estimation of the dispersion of wind borne material, Met. Magazine, 90, 1063, 33-49.

Peterson, R.L., et al., 1974: Analysis of plume dispersion and initial plume dilution based on aerial observations of large, elevated point source, preprint Symp. Atmos. Diff. and Air Poll., 97-100.

Sakaraba, S., 1970: Sensitivity of air quality prediction to input errors and uncertainties, proc. Symp. Multiple-Source Urban Diffusion Models, 7-1~7-23.

Stewart, N.G. et al., 1958: The atmospheric diffusion of gases discharged from the chimney of Harwell reactor BEPO, Int. J. Air Poll., 1, 87-102.

Turner, D.B., 1967: Workbook of atmospheric dispersion estimates, NAPCA, PHS publ. No. 999-AP-26.

Vogt, K.J., 1977: A new system of release height dependent diffusion parameters for the Gaussian plume model, proc. 4th Int. Clean Air Cong., 171-175.