

§1. 概説

大気有害成分による汚染はその形態によって2つに大別することができる。その第1は広域を覆う大容量の空気が高濃度に汚染される場合である。風が静穏であって空気が移動しないときや、地表面近くの大気が不安定でその乱れが強いが数百m上空に気温の逆転層が存在して都市域を覆う大気が全体としては同じ位置に停滞し、全体の大気汚染濃度が非常に高くなる時である。このような場合にはスモールスケールよりもメソスケール、シノプティックスケールの気象状態によって汚染物質の他の地域への輸送拡散を評価することができる。第2は煙源の風下で発生する疾風汚染の場合である。この場合汚染現象は地表面より数十m上空以下の接地境界層内の風向、風速、大気安定度などのスモールスケールの気象状態に支配される。

大工業都市は排出量の多い巨大汚染源とともに中小規模の汚染源が面的に分布しているため、汚染は局地性と広域性の2つの面の特徴を合わせ持っている。このような地域の汚染濃度の面的分布を予測する際にはシノプティックスケール、メソスケールの気象条件のデータとスモールスケールの気象条件のデータとの併用が合理的である。気象現象のスケールと、大気汚染のスケールの関係を示すとFig.1のようなブロックダイアグラムとなる。

自然大気中に排出される有害ガスの輸送伝播過程の解析とその定量的な濃度予測を行なおうとするとき出会う問題は次の4項目である。

- (イ) 実際の煙の流動状態を示す数式モデルの設定。
- (ロ) 上空の大気の流動状態が十分明らかでないので推定する。上空の状態を常時観測できないので地表近くの観測値から推定せねばならないが今のところ十分確かではない。
- (ハ) 大気汚染濃度を予測するために必要な気象因子の予測。汚染物質の拡散に大きな作用を与える気象要素でかつ予測しやすいものを見つけ、その予測精度を明らかにすることが必要である。
- (ニ) 入力となる気象要素の詳しさに対する汚染予測の精度の関係がわからないので明らかにする。

本報告ではこれら問題点解決の一端として、大阪地方

についての汚染物質の排出強度の経時変化と汚染濃度実測値をつかって同地方の大気浄化能力を定量的に求めた。同時に濃度推定を行ない、排出量を抑制すればどのような環境濃度になるかを検討した。気象要素としては、気圧配置の時間変化がわかった場合と、1時間ごとの風向、風速、日射量、雲量がわかった場合の2つを設定した。

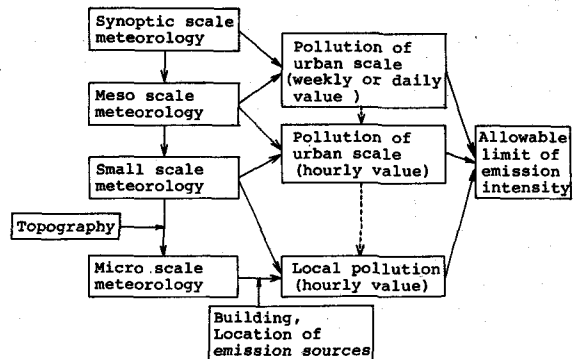


Fig.1 Meteorological and Pollution Scales

§2 都市スケールの大気拡散

広域の平均大気汚染濃度予測を目的として汚染物質の混合輸送を定量的に取扱った例には、Dickson⁽¹⁾, Williams⁽²⁾, Miller⁽³⁾らによる研究があげられる。Dickson, Williams は気象現象と汚染の程度を独特の方法で関係づけたのに対して、Lucas⁽⁴⁾, Turner⁽⁵⁾, Pooler⁽⁶⁾らの提示している方法は簡単化した定常拡散公式を都市域濃度計算に

応用したものである。都市全域にわたる平均濃度の予測のための広域汚染数式モデルは非常に少ない。

Miller と Holzworth⁽⁷⁾ や Holzworth⁽⁸⁾ によって表わされた式は広域汚染と排出強度を与えて定量的に推定するものであるが、わが国では彼らの方法をそのまゝの形で汚染がテンレール予測の手段としてあてはめることには問題が多い。そこで次に汚染濃度データと気象条件とから広域の都市スケールの汚染物質の拡散浄化能力と評価するための基本モデルを提示する。

都市全域の平均大気汚染濃度は、その全域に適当な距離で分散した観測点で測定される汚染濃度と、同地点の観測値によって代表される地域面積との積の和を全面積で除した値とすることができる。固定した地域の上空にある大気の汚染濃度を決定する因子は、その地域の汚染物質排出強度、その大気汚染物質が上方へ広がらうる能力と汚染大気の水平方向への移動速度とすることができる。したがって大気の浄化能力は対象地域を覆う汚染大気の容積とその大気槽に流入する空気の単位時間当りの流量を指標に選ぶことによって表わすことができる。巨視的に汚染物質の物質収支をとると、広域汚染濃度と生成消滅を含む次式を得る。

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \Gamma(C_{out} - \bar{C}) + \frac{Q_A}{Z} - k\bar{C} \quad (1)$$

ここで Γ は換気回数 (hr^{-1})、 Q_A は都市全域の単位面積当りの平均排出強度 (m/hr)、 Z は汚染大気の層の厚さに対応する量 (m)、 k は降雨などによる汚染物質消滅速度定数 (hr^{-1})、 C_{out} は都市域外から流入する大気の汚染濃度 (ppm) である。 Γ のとりうる値の大きさは L を都市域の大きさとし、 U を高さ Z と地表との間の平均移送風速とすると、

$$\Gamma \approx \frac{U}{L} + (\text{鉛直方向の拡散による実効浄化効果}) \quad (2)$$

ここで水平方向の拡散と鉛直方向の高さ Z 面での拡散の効果による実質的な空気の移動量は風速 U による移動量よりも小さいであろう。

対象地域を覆う大気中にある汚染物質の浄化能力は、式(1)中にあるパラメーター Γ と Z および k で評価することができる。 Z が大きくなると汚染物質の単位容積当りの排出強度が小さくなる。 Z が大きな値をとっても、 $(\Gamma + k)$ が小さな値をとれば、汚染物質をなかなか浄化しないことになる。そこで $(\Gamma + k)Z$ を浄化能力を定量的に表示するパラメーターとして大気汚染浄化指数と名づけた。

大気汚染濃度を推定するときに生ずる誤差は利用した拡散数式モデルそのものの欠陥の他に、式で使うパラメーターの値の決定に原因することが多い。筆者が提示したパラメーターのうち Z は、汚染濃度の立体的分布の実測から直接推定することが不可能な量である。 Γ は式(2)から近似的に求められるが厳密な値を直接推定することはできない。2つのパラメーターがもつこのような性質から、それらの値は連続的に得られている広域汚染濃度の実測値を使って計算によって推定するか、あるいは現象論的に推定しやすいパラメーターたとえば Γ を決定論的に直接、値を与え、 Z のみをパラメーター推定するかのいずれかである。

パラメーターの推定は次の評価関数によって行なう。

$$P.I. = \sum_{i=1}^m \{ C_{obs}(t_i) - \bar{C}(t_i) \}^2 \longrightarrow \text{最小} \quad (3)$$

ここで $C_{obs}(t_i)$ は対象地域全域平均汚染濃度実測値 (ppm)、 $\bar{C}(t_i)$ は同時刻の計算によって推定した値、 t_i は時刻を示す。濃度実測値が1時間ごとに与えられるものとする、 t_{i+1} は t_i より1時間先の時刻を示す。

汚染物質はいおう酸化物であり、排出強度、汚染濃度データは昭和43年12月平日のものを使った。排出量データは Fig. 6 に示す。気象観測値は午前6時の日刊天気図に書かれた気圧配置、大阪管区气象台で得られた風向、風速、日射量、雪量、雨量、気圧の定時観測値、および府下14の汚染観測所で測定された風向、風速の経時変化

である。

§3 浄化パラメーターの検討

1) 気圧配置と浄化能力

気圧配置は広域的な風向、風速、気温分布、雲量、日射量など大気条件の巨視的な推定を可能にし、また局所的な限られた気象要素によるよりも総合的な大気条件とその変動の評価を可能にする。そこで気象状態の指標として気圧配置を選び、それを数種類のグループに類別し、その分類ごとに浄化能力の定量的な評価を行なった。Table-1 に分類を示す。分類 No.13 の天気は等圧線が北東から南西に走り、東南に高気圧がある、西に低気圧、東に寒冷前線があるとき、ないしは西に前線、東に低気圧があるいわゆる気圧の鞍部とは見なせないが、低気圧が続いて通過するときなど多くの場合を含む。Table. 2 は浄化指数を示すが、これによると寒冷前線の通過後がもっとも大きく、高気圧の後面から寒冷前線の通過前までが最小となることが認められた。Fig.2 は浄化指数の日変化を示したものである。晴れているときは朝6時頃から9時頃に於いて浄化指数は非常に小さな値をとる。これは夜間にできた放射逆転層の存在によって空気が動きにくくなるためであろう。一方天気が悪い気象区分にあたる分類 No.8 のときは浄化指数が1日中ほとんど変化しない。これは日射、夜間の放射が雲の存在によって少なくなり、温度成層的な安定度が時刻によって変動しないことによるものと推定される。パラメーター

Table 1 A Classification of an Atmospheric Pressure Distribution

1. An anticyclone approaching the Osaka district (i) The center is within the limits of long. 120°-130°E and lat. 30°-40°N (ii) The Osaka district is within the limits of -2- -4 mb from the center pressure
2. An anticyclone over the Osaka district (i) The center is within the limits of long. 130°-140°E and lat. 30°-40°N (ii) The Osaka district is within -2 mb from the center pressure
3. The Osaka district located behind an anticyclone (i) The center is within the limits of long. 140°-150°E and lat. 30°-40°N (ii) The Osaka district is within the limits of -2- -4 mb from the center pressure
4. A cold front over the Japan Sea A cold front reaches the limits of long. 130°-140°E and lat. 30°-40°N, and does not cross over the Japan islands
5. A cold front approaching the Osaka district A cold front is within the limits of long. 130°-140°E and lat. 30°-40°N, and crosses over the Japan islands
6. The Osaka district located behind a cold front and within the limits of long. 130°-140°E and lat. 30°-40°N
7. A surface weather map of a winter type (i) Strong (ii) Weak
8. A cyclon within the limits of lat. 30°N and the Osaka district (i) A cyclon is within the westside than long. 130°E and approaches the Osaka district (ii) A cyclon is within the limits of long. 130°-138°E
9. A col of an atmospheric pressure over the Osaka district
10. An anticyclone belt over the Osaka district
11. A cyclon approaching the Osaka district after passing of an anticyclone
12. An anticyclone approaching the Osaka district after passing of a cyclon
13. Others

ΓとZのもつ特徴を知るため平均風速との関係について行なった考察によると、Zは風速が大きいかほど小さな値をとる傾向があり、Γは風速が大きくなるほど大きな値をとる。しかし天気が悪いときは風速に比例する傾向が明白に現われ、天気が良いときには風速より大気安定度に関連することがわかった。

同じ分類に属していても、気圧のスケール、気圧傾度、形状の違いは常にあり、それによってパラメーター

Table 2 Estimated Values of Z and Γ for Each Category of Pressure Distribution

Categories	Z (m)	Γ (1/hr)	Z·Γ (m/hr)
1	600	0.65	387
2	1100	0.31	346
3	1100	0.21	234
4	1100	0.29	326
5	500	0.58	290
6	500	1.3	650
7 -i)	700	0.70	490
-ii)	700	0.61	427
8	300	1.7	510

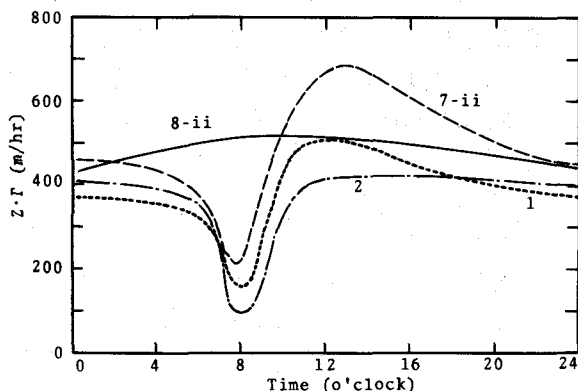


Fig.2 Diurnal Variation of a Clarification Index

の値も大きく異なるであろう。

(2) 気象要素と浄化能力

パラメーター Γ は式(2)の右辺第2項を無視して風速のみの関数とみなし次の仮定のもとに式(4)で与えた。

(1) 上空1kmまでは風速プロファイルに指数分布法則がなりたちその指数を0.4とする。(2) 風の測定地点の平均高度を15mとする。(3) 都市の大きさを示す代表径長を簡単化するため大阪地方の対象地域を円形と見なし、しはその直径、23.64 Kmに等しいものとする。

$$\left. \begin{aligned} Z \leq 1000 \text{ m} &\longrightarrow \Gamma = 0.1086 U(15) \cdot (Z/15)^{0.4} \quad (\text{hr}^{-1}) \\ Z > 1000 \text{ m} &\longrightarrow \Gamma = 0.152 U(15) \cdot (1000/15)^{0.4} (1.0 - 286.0/Z) \end{aligned} \right\} (5)$$

パラメーター Z は式(2)で $m=3$, $\Delta t=1 \text{ hr}$ として1時間ごとに推定した。大気の混合拡散力も地表面で観測した風速、日射量、雲量によって推定しようとするならば、それは過去数時間にわたる諸気象現象の履歴の結果として与えられるので、過去数時間の諸データを同時に採用せねばならない。以上の観点からパラメーター Z は次のような気象因子と重回帰方程式によって関係づけられた。

- (a) その時点での対象地域の地上平均風速 U (m/sec)。
- (b) 4時間前からその時点までの雲量の平均値 C_d 。
- (c) その時点までのその日の全水平面日射量 q (cal/cm²)。

Table 4 は Z とこれら合成要素との回帰方程式を示している。なお各合成気象要素と Z の相関係数を Fig. 3 に示す。14時から16時までの時間帯で Z に関する回帰式を求めているが、それはその時間に海風が発生し、一度海上へ出た汚染大気がふたたび同地域上空に戻ってくる場合が多いため推定した Z の値にそれが影響するので信頼できるデータの個数が少なかったためである。このような回帰式を使って典型的な快晴日と曇天日についての気象ポテンシャルの経時変化を図示すると Fig. 4 および Fig. 5 となった。いずれも横軸に風速をとっている。

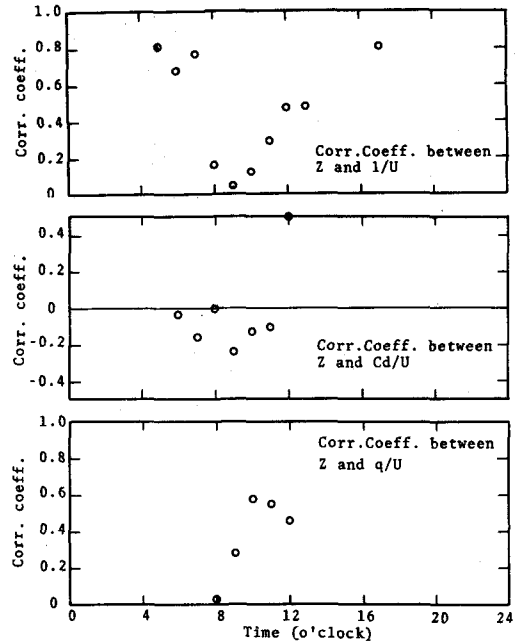


Fig. 3 Correlation between Synthesized Meteorological Factors and Parameter Z

Table 3 The Regression Line between Large Scale Mixing Parameter Z and Meteorological Factors

Time(o'clock)	Regression equation	Multi. Corr. coeff.	No. of sample
17-5	$Z=127.4+779.1/U^*$ or $Z=132.4+591.7/U^{**}$	0.805 0.901	93 41
6	$Z=282.8+443.0/U-13.7Cd/U$	0.704	17
7	$Z=277.6+240.3/U-3.14Cd/U$	0.779	17
8	$Z=346.9+51.96/U$	0.160	17
9	$Z=469.9+24.3q/U-294.6/U$	0.467	18
10	$Z=465.6+20.9q/U-443.4/U$	0.710	18
11	$Z=438.5+10.2q/U-223.8/U$	0.592	18
12,13	$Z=303.8+89.3Cd/U+6.61q/U-797.6/U$	0.795	19

* : Wind direction 15-3

** : Wind direction 7-14

U : Wind speed (m/sec)

Cd: Cloudiness

q : Insolation (cal/cm²)

§4 濃度推定と排出源制御

前節(2)による方法で得た日平均汚染濃度予測値を Table 4 に示す。また1時間平均値の予測値のその正規化された実測値のまわりの標準偏差は 0.29であった。

Fig. 6 は排出強度の日変化を示すが、かりに1日を通して排出強度を50%に減少すれば (Fig. 6の点線) 汚染濃度計算値は Table 4 の Cest [1] のようになり日平均濃度が 0.25 ppmを越えることはない。また Fig. 6の鎖線のように排出強度が $1.4 \times 10^4 \text{ kg/hr(S)}$ よりも大きい所をカットすると Table 4 の Cest [2]

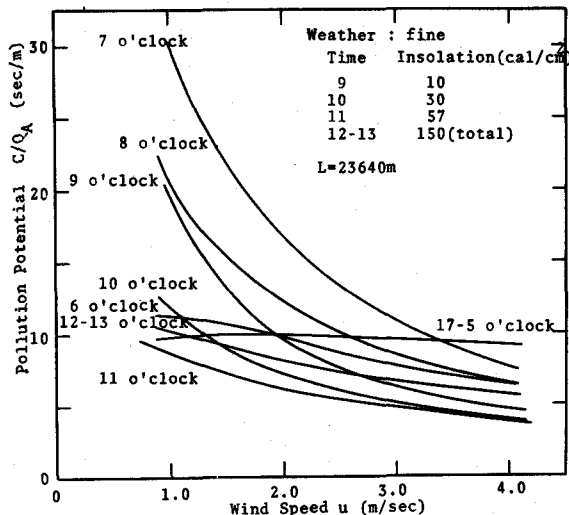


Fig. 4 Pollution Potential and Wind Speed in the Fine Weather

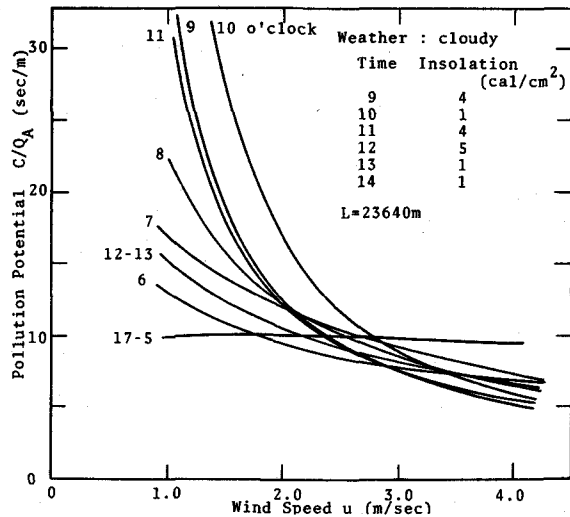


Fig. 5 Pollution Potential and Wind Speed in the Cloudy Weather

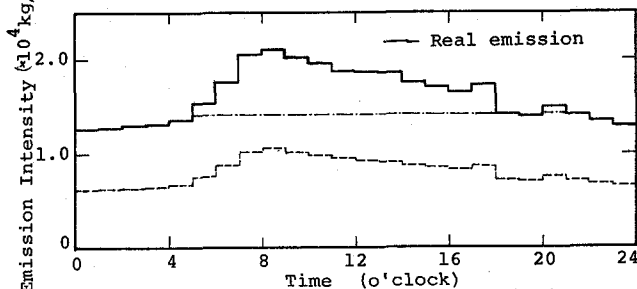


Fig. 6 Diurnal Variation of Sulfur Emission

Table 4 Observed and Estimated Values of Daily Average SO_x Concentration (ppm)

Date	C _{observed}	C _{est} [1]	C _{est} [2]	C _{est} [3]
Dec. 3	0.0587	0.0310	0.0495	0.0544
4	0.0524	0.0246	0.0422	0.0471
5	0.0422	0.0233	0.0385	0.0460
6	0.0483	0.0270	0.0467	0.0517
7	0.0688	0.0331	0.0558	0.0618
11	0.0412	0.0221	0.0385	0.0428
12	0.0444	0.0176	0.0309	0.0346
13	0.0361	0.0240	0.0417	0.0408
14	0.0512	0.0238	0.0402	0.0462
17	0.0560	0.0284	0.0495	0.0523
18	0.0706	0.0355	0.0621	0.0650
20	0.0674	0.0458	0.0752	0.0783
21	0.0702	0.0327	0.0518	0.0537
24	0.0574	0.0297	0.0471	0.0481
25	0.0635	0.0319	0.0541	0.0596

[1]: Reduction rate of S = 0.5

[2]: Maximum emission of S = 1.4×10^4 kg/hr

[3]: Estimation for no control of S

のようになる。

濃度予測計算は気象データが正しく予測されるものと仮定して進めたが、とくに海陸風の発生時に濃度推定値がはずれる場合が多い。一応をどってくる大気の汚染濃度を数式から推定したがその結果は十分であるとはいえない。したがって野外実測による汚染大気の逆流現象

の検討が必要であろう。なお本研究の一部は昭和45年度文部省科研費奨励研究Aの補助により行ない、また本論文の数値計算は京都大学大型計算機センターを利用した。

引用文献

- (1) Dickson, R.R. (1961) Amer. Met. Soc. 42: 556-560
- (2) Williams R. Jr. (1964) J. Applied Met. 3: 92-97
- (3) Miller M.E. (1964) Mon. Wea. Rev. 92: 23-32
- (4) Lucas D.H. (1958) J. Applied Met. 3: 17-1
- (5) Turner D.B. (1964) J. Applied Met. 3: 46-50
- (6) Pooler F. (1961) J. J. Air and W. Poll. 4: 17-1
- (7) Miller M.E. & Holzworth G.C. (1967) J. APCA. 17: 1 46-50
- (8) Holzworth G.C. (1970) 2nd Int. Clean Air Cong.

ME-20C