

§1 はじめに

都市域の大気汚染濃度の時間変化を予測するための数学モデルには単一汚染源を対象とした定常拡散式の解をそのまま適用せず種々の改良が加えられている。特に汚染物質排出強度と気象現象の非定常性が考慮されてきている。数学モデルの作成と平行して濃度推定の方法論が重要な問題となるが、気象現象は不確定な要素を多く含むため気象学的には傾向法、持続法などの言葉で表わされる方法が気象予測の常套手段となっており、決定論的な方法の他に適応論的方法が有効なものとなっている。

本報告では既発表(1)の数学モデルとその式中に含まれたパラメータの推定法に改良を加え、都市数 K km²のスケールの局地大気汚染濃度予測をこれらの方法論によって行ない、精度の検討と同時に他の数学モデルとの比較を行なった。ここで扱った大気汚染物質はいおう酸化物であり、濃度計算と解析を行なった地点は大阪府公室監視センターで、使用したデータは1988年12月のものである。

§2 大気汚染数学モデルと計算条件

汚染物質の伝播過程を単一の簡単な数学モデルで表現することは気象現象、大気の流れ、拡散のメカニズムが複雑なため不可能と見なしてよい。したがって対象とする時間、空間スケールまたは現象に応じて複数個の数学モデルを作成し、それらを組み合わせて相互の欠点を補う方法をとることが合理的であると考えた。そこで都市域全体の平均汚染濃度を対象とした広域汚染モデル(2)中に含まれたパラメータ Z を局地汚染モデルの計算の助けとして組み込むことを試みた。パラメータ Z は平均風速、日射量、雲量の関数として既に与えられている(2)。

局地汚染モデルは次式で与えられている。

$$\frac{d\hat{C}}{dt} = \gamma(C_b - \hat{C}) - k\hat{C} + \frac{Q_{in}}{Z} \quad (1)$$

$$C_b = \frac{1}{\xi} \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{n_1}{\theta} \frac{\Delta T_{ij}}{\tau U_{ij}} \left[\sum_{i=1}^{N_j} \frac{\varepsilon_i Q_{aij}(t - t_{hij})}{\alpha x_{Eij}^{1+\nu}} - \sum_{i=1}^{M_j} \frac{\varepsilon_{ij} Q_{pij}(t - t_{hij})}{\alpha x_{ij}^{1+\nu}} \exp\left(-\frac{k_{bij}^2}{2\alpha^2 x_{ij}^{2\nu}}\right) \right] \quad (2)$$

ここで n_1, n_2 は換算係数、 $\varepsilon_i, \varepsilon_{ij}$ は燃料中いおう含有率、 $\hat{C}$ は局地汚染濃度、 Z は観測点と覆う混合層の高さ、 γ は局地混合層内の空気の換気回数、 C_b は混合層外部から伝播してくる汚染物質濃度、 Q_{in} は混合層内の単位面積当りの排出強度、 Q_{pij}, Q_{aij} は j 方位にある i 番目の点および面汚染源排出強度、 $\theta = 2.7^\circ$ ラジアン、 α は排出源と観測点との距離、 ΔT_{ij} は風速を示す。

煙の拡散に正規分布を仮定した式では鉛直方向の分散を表わすパラメータ σ_z はPasquill⁽³⁾が示したチャートから αx^ν なる関数形を近似し、式(2)では σ_z の代わりに αx^ν を代入している。表-1に θ と α の関係を示す。ここで D_2 は安定度 D に相当する。分類 D の近くの曲線 D_1 を示す近似式から求めた C_b を基準濃度として各安定度に対して求めた C_b の値を無次元化表示すると図-1となった。この結果からパラメータの数を減らすために安定度 D での σ_z の関数式を使って求めた C_b に $1/\xi$ を乗じ、この ξ を適当に変動させることによって他の安定度における C_b の値を推定した。

濃度計算諸条件を示すと表2となる。

§3 拡散パラメータの検討と

濃度計算法

3-1 Zとξの関係: 汚染物質の水平伝播を表わす式(2)は都市の中のオーダの煙流を表わすため、その拡散は局地気象条件のみならず広域の気象条件と汚染物質の浄化能力によって評価することができる。式(2)でξが大気混合力を示す唯一のパラメータである。ξとZの関係を求めたところ図-2となった。ξとZの関係式は

$$\xi = 0.000276 Z^{1.4} \quad (3)$$

と得、両辺の対数をとって線形化したときの式の重相関係数は0.690であった。

定常状態を仮定した場合、広域汚染モデルから次式を得る。

$$\frac{\bar{C}}{Q_A} = \frac{1}{\Gamma Z} \sim \frac{1}{u(z_0) Z^{1.3 \sim 1.4}} \quad (4)$$

ここでΓは $\Gamma \sim Z^{0.3 \sim 0.4} u(z_0)$ であり $u(z_0)$ は高さ z_0 での水平風速である。

従って式(3)と式(2)から C_b/Q もまた式(4)と等しい式形を得る。

3-2 Zとzの関係: 既発表の論文でパラメータzは温度成層上、安定ないしは中立であると推定されたときにパラメータ推定で求めた値の平均値

として150 mを使ったが、大気安定度が変わるときzを常に一定にしておくことは現象論的に不合理である。しかし気温や汚染濃度の鉛直分布が測定されないためzをこれらの実測値から推定することは不可能であるので広域のパラメータZの関数としてzを与えた。既にZとzは共に風速が小さくなるほど大きくなる値となり、 $z \propto Z$ となることが認められている。一方煙の鉛直方向の分散が拡散式中の σ_z で与えられるが、大気鉛直方向の乱れが高さに比例して不変であるものとする、Zとzは水平方向の伝播規模と鉛直方向の拡散の規模から式(5)のような関係が得られる。ここで L_e は混合槽の水平方向の径で $L_e = 4 \text{ km}$ 、Lは都市の径、大坂地方で $L = 23.64 \text{ km}$ 、 $\psi = 0.811$ を設定した。

Table-1

Stability Categories	σ_z
B	$0.0583x^{1.09}$
C	$0.108x^{0.918}$
D1	$0.123x^{0.811}$
D2	$0.446x^{0.671}$
E	$0.515x^{0.529}$
F	$0.523x^{0.488}$

for $2 \text{ km} < x < 10 \text{ km}$

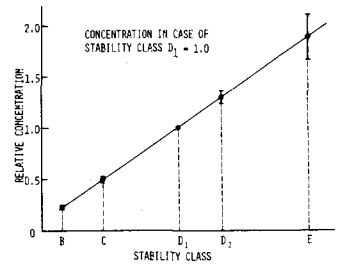


Fig. 1

Table-2

- i 排出源は巨大なものから66ヶを真汚染源とする。その他は面汚染源として観測点のまわりに16方位を分し、半径方向には $2 \text{ km} \sim 3.5 \text{ km}$ 、 $3.5 \text{ km} \sim 5.5 \text{ km}$ の2つの扇形に分割を行ない、計算点のまわりに計32の面汚染源を考える。
- ii 観測点を中心として混合槽の半径を 2 km 、高さは変動しうるものとする。
- iii 汚染物質の到達時間遅れ T_h を考え C_b の計算過程で

$3 \text{ 時間} \leq T_h$	排出源の影響を無視
$2 \text{ 時間} \leq T_h < 3 \text{ 時間}$	2時間前の排出強度
$1 \text{ 時間} \leq T_h < 2 \text{ 時間}$	1時間前の
$0 \text{ 時間} \leq T_h < 1 \text{ 時間}$	現在の
- iv 汚染源高度は面汚染源は地表面上、真汚染源は実際の煙突高度を使用する。
気象データとしては
- v 地上風向の1時間代表値の日変化(汚染濃度観測点の値)
- vi 地上風速の1時間平均値の日変化(汚染濃度観測点の値)
- vii 地上日射量の1時間値の日変化(広域平均値)
- viii 雲量の日変化(広域平均値)
- ix 雨量の日変化(広域平均値)

$$\frac{z}{L_e} = \left(\frac{L_e}{L} \right)^\gamma \quad (5)$$

3-3 パラメータ γ : γ は水平方向の風による輸送と鉛直方向の混合拡散による項の和として求められた。

$$\gamma = \left\{ 0.0104 \frac{du}{dz} + \frac{1}{L_e z} \int_0^z u(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{0.4} dz_0 \right\} 3600 \quad (6)$$

1/hr

ここで風速分布は指数法則がなりたつものとした。

3-4 適応論的濃度計算法

式(1)中での諸パラメータが Δt 時間の間、変化しないものとするとき式(1)は次式ようになる。

$$\hat{C}(t+\Delta t) = \hat{C}(t) \exp\{-\gamma(t) + 0.47w(t)\}\Delta t + [1 - \exp\{-\gamma(t) + 0.47w(t)\}\Delta t] \left\{ \frac{Q_{in}}{Z} + \gamma(t)C \right\} \frac{\eta}{\gamma(t) + 0.47w(t)} \quad (7)$$

ここで右辺の2項にパラメータ η を乗ずることによって η と z とを同じ重みで補正する適応パラメータとした。 $\Delta t=1$ として $\hat{C}(t+1)$ と $\hat{C}(t)$ にそれぞれ実測濃度データを代入し、 $\eta(t)$ を求める。この $\eta(t)$ を各時刻ごとに平均化すると図-3となった。この $\eta(t)$ の日変化は1日を周期とする周期性を持つことがわかった。平均値 $\eta_0(t)$ のまわりの標準偏差は破線で示される。

このような $\eta_0(t)$ が持つ周期性から $\eta(t)$ は $\eta_0(t)\eta'$ において η' を適応的に推定することによって一種の周期法により $\eta(t)$ を求めた。 η' は次式を満足するような式で与えられる。

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \eta(t-t_i) - \eta_0(t-t_i) \right\}^2 W_t(t-t_i) \rightarrow \text{最小} \quad (8)$$

ここで $\eta(t-t_i)$ は $t-t_i$ 時に式(7)の $\hat{C}$ に実測値を代入して推定した η の値で、 $W_t(t-t_i)$ はその時刻に対する重みを表わす。 t は現時刻、 t_i は n 時間前を意味する。重み関数は

$$W_t(t-t_i) = S^{t_i} \quad (9)$$

とおいた。

§4 濃度推定結果および考察

濃度計算は式(9)の S の値が 0.0, 0.5, 0.9, 1.0 の4つの場合と $\eta'(t)=1.0$ のときについて行なった。予測値の精度は次式で示される無次元標準偏差で評価した。ここで $C_{obs}(t)$ は観測値。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{\hat{C}(t) - C_{obs}(t)}{C_{obs}(t)} \right\}^2} \quad (10)$$

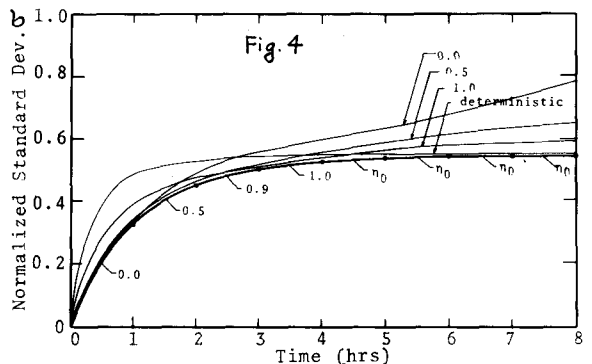
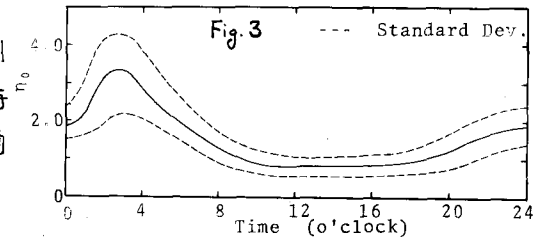
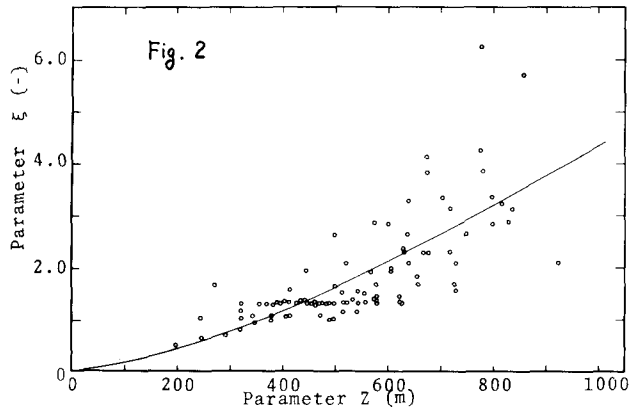
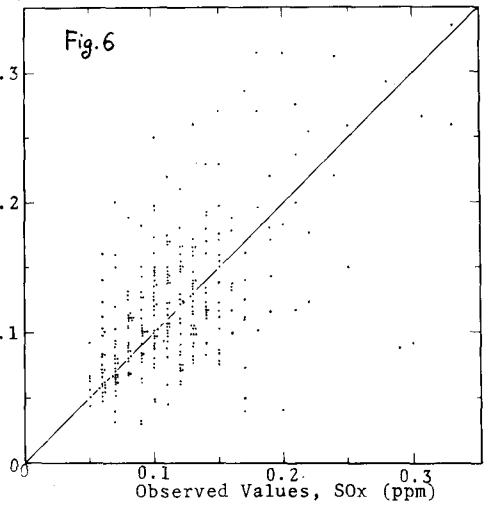
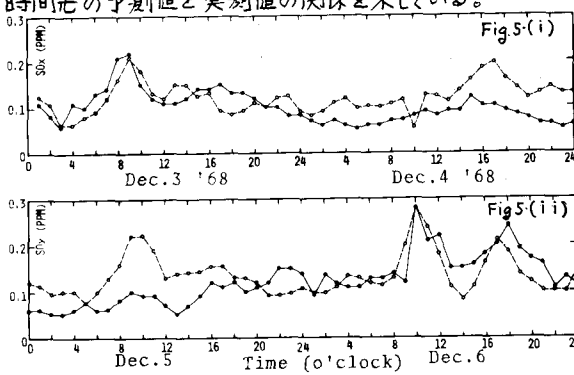


図-4は横軸に予測時間、縦軸に無次元標準偏差を与える。図中の数値は設定した式(9)の ρ の値、 η_0 と記された所は $\eta(x)=1.0$ となわち決定論的な方法による結果を示す。この図から短時間先の予測には最近の短時間に推定したパラメータ η の値を重視し、長時間先の予測には長時間前から現在までになわたり求めた η の値を重視して推定した η を使えばよいことがわかる。特に太線は ρ の値を予測する時間に応じて変動させた場合のものである。以後の予測計算結果はこの太線による ρ の値を使っている。図-5は6時間先の濃度予測値とそのときの実測値を日時を横軸にしてプロットしたものである。図-6は2時間先の予測値と実測値の関係を示している。



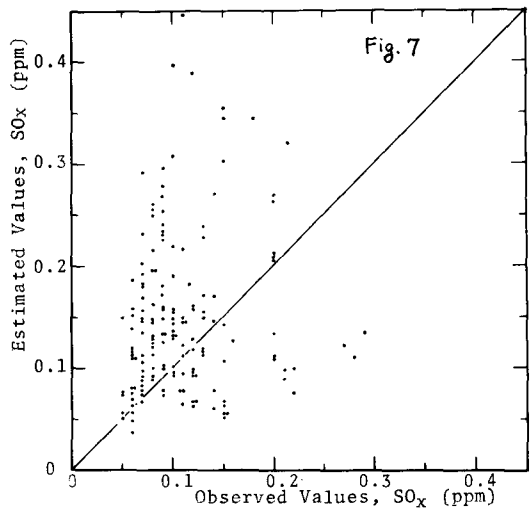
§5 他の数学モデルによる結果との比較

筆者らはPoolerやClarke⁽⁴⁾と同じ方法によって定常拡散式を使って決定論的な方法で濃度の推定を行なった。安定度の分類はPasquillの分類表に従っている。ここで半径2km以内の面汚染源はその排気強度が均一であるものとして半径500m以遠のみを対象として計算した。この区間で筆者らは $\overline{u_z}$ を表す近似曲線として表-3で示される式を求めそれを利用した。図-7はその計算値と実測値の関係を示している。この無次元標準偏差は0.937であり、筆者らのモデルの計算精度の方がはるかに良いことを示している。また大気安定度がA-Fのいずれにも属さぬときが非常に多く、安定度分類が一投皆変ると濃度計算値が不連続に大きく変動することが認められた。

Table-3

Stability Categories	σ_z
B	$0.0587x^{1.09}$
C	$0.103x^{0.924}$
D	$0.180x^{0.712}$
E	$0.193x^{0.680}$
F	$0.130x^{0.676}$

for $0.5\text{km} < x < 2\text{km}$



引用文献

1. 高松武一郎, 池田有光 1970: 大気汚染研究 4, 2, 194-203
2. 池田有光, 平岡正勝 1972: 工学会論文報告集, 204
3. Pasquill F, 1961: Atmospheric Diffusion, D. Van Nostrand Co. London
4. Pooler F, 1961: I.J. Air & Water Pollution 4, 199-211