

広域大気汚染に関する電算シミュレータの開発 (I)

北山正文・玉野和保

Numerical Simulation of an Air Pollution on Wide Area

By Yoshifumi KITAYAMA and Kazuho TAMANO

Effective air pollution abatement necessitates having a quantitative evaluation of the effect of environmental factors; wind velocities, temperature and topography on the movement of a pollutant.

As a method evaluating synthetically for the environmental pollution, a simulator for air pollution has been developed, in which the system prints out a three dimensional pollutant concentration for each weather mode and for the distribution averaged over a long period, superimposes these results.

The principle of simulating method for this system is described.

1. ま え が き

戦後我国の経済は驚異的發展を遂げ国民の所得の大幅な増加を達成させたが一方で住民の生活の悪化を招くこととなった。特に工場の建設ならびに交通量の増加に伴う大気汚染、悪臭、振動、騒音そして海や河川の汚濁は住民に生活環境に対する強い不安をいだかせている。このような環境の悪化についてはその評価手法の開発の遅れも一原因とされている。評価手法の開発は諸外国はもとより我国でも環境庁をはじめ諸機関において強い関心が持たれている。また環境状況は各々の環境状況の把握だけによるのではなく、これらの諸評価手法が有機的結合を持ち総合的に環境状況を把握し評価することが必要とされている。

このような状況に対し電算による総合環境管理システムの開発を行ってきた。本報ではこの一環として開発してきた地勢を考慮した各気象モードの重ね合せ方式による3次元拡散モデルに基づく広域大気汚染シミュレータについてそのシステムの概要を述べる。

2. シミュレーション手法

種々の運転状態にある発生源から大気汚染物質が複雑な地勢ならびに気象条件を有す広い地域に輸送・拡散される、特に海を前にした狭い平野部に工場が立地することの多い我国についてはその地域の大気汚染の予測システムとして

- 1) 複雑な地勢の上空層から地表までの種々の気象条件下での風の流れを記述できる。
- 2) 種々の気象条件について地勢の影響を考慮した汚染分布状態が記述できる。
- 3) 多数の汚染物質発生源による拡散が記述できる。の点が考慮される必要がある。

本システムでは汚染分布の広がりと行政区域を考察した結果に基づく発生源群を含めた20km平方内の地形ならびに土地利用現況による地勢データを基礎とし、2,000m上空の地衡風と地上の気温分布によって各種の局所大気安定度の下で2,000m上空から地表までの風速・風向分布を求め、これによって多数の発生源か

らの汚染物質をボックスモデルにより3次元輸送・拡散させる手法で地上汚染物質濃度分布を得る。

以下に計算手法を説明する。

2-1 風向・風速分布計算

種々の建造物および樹木等が存在し複雑な起伏を有す地上の空気流は一般には乱流状態にあり流れの厳密な記述は不可能である。しかし、

- 1) 流れの乱れは汚染物質の拡散計算において拡散係数を乱流渦拡散係数としてこれに含め、空気流の平均的な流れについてのみ記述する。
 - 2) 平均的な空気の流れは理想的なポテンシャル流れと見なす。
 - 3) 但し空気渦粘性が影響してくる地表付近の平均的な流れに対しては経験的に乱流に対する指数速度分布則をあてはめる。
 - 4) 平均的な流れは地衡風および地上の気温分布により決定される。
 - 5) コリオリの力に基づく流れのエクマンスパイラルは考慮しない。
- と仮定することにより風の流れは次に示すポアソン型の式で近似できる¹⁾。

$$F(KF\phi) = Q \quad \dots\dots(1)$$

ここで K は流れ係数で h を地表からの高さとし BTL を乱流境界層厚さとする経験的指数法則より

$$K = (h/BTL)^P \quad \dots\dots(2)$$

と示される。 P は地表の表面状態²⁾と大気安定度³⁾により決定される。

ϕ は速度ポテンシャルを Q は対流による空気の仮想吹出または吸込の流量を示す。

風の流れ V は(1)式より

$$V = KF\phi \quad \dots\dots(3)$$

で得ることができる。

従って、(1)式を与えられた境界条件の下で解けば領域内の風の流れの分布状態を得ることができる。

(1)式を電算機で解かすため次のように有限差分化する。

$$VP_i + VP_j + VP_k = Q_{ijk} \quad \dots\dots(4)$$

ここで VP_l は

$$VP_l = (F_{l1} \cdot K_{l+\frac{1}{2}}/L_{l1} + F_{l0} \cdot K_{l-\frac{1}{2}}/L_{l0}) \cdot$$

$$-\phi_{ijk}(K_{l+\frac{1}{2}}/L_{l1} + K_{l-\frac{1}{2}}/L_{l0}) / \{(L_{l1} + L_{l0})/2\} \quad \dots\dots(5)$$

但し、 i, j, k は領域のメッシュ番号で i は南北、 j は東西、 k は上下の各軸上の番号を示す。 $K_{l+\frac{1}{2}}$ および $K_{l-\frac{1}{2}}$ は今 l を i とした場合、各々 $(i + \frac{1}{2}, j, k)$ および $(i - \frac{1}{2}, j, k)$ 点の流れ係数を示す。 F_{l1} および F_{l0} は各々 (i, j, k) 点より l の軸の増加方向のメッシュ幅 L_{l1} および減少方向のメッシュ幅 L_{l0} 移動した点の速度ポテンシャルを示す。

(4)式的全領域についての連立方程式を解けば各メッシュ点での ϕ_{ijk} の値を得る。大型の行列の電算処理に対しては逐次過緩和法(SOR法)が有効である⁴⁾。従って ϕ_{ijk} は

$$\phi_{ijk}^n = \phi_{ijk}^{n-1} + \omega \Delta \phi_{ijk} \quad \dots\dots(6)$$

としてくり返し収束させることで決定できる。

ここで n は収束のためのくり返しを示し、 ω は緩和係数で最適値は

$$\omega = (1/6) \{2 / (1 + \sqrt{1 - \rho})\} \quad \dots\dots(7)$$

で示される。但し、 ρ は行列の処理に現われる誤差のスペクトル半径である。

また $\Delta \phi_{ijk}$ は(4)式から整理して得られる ϕ_{ijk} と ϕ_{ijk}^{n-1} の差である。

境界条件は

- 1) 計算領域の最上面各メッシュ点に2,000m上空の地衡風データから求めた速度ポテンシャルを与える。
- 2) 計算領域の側面では、風速・風向の変化はない。
- 3) 地表表面においては速度ポテンシャルを地表に沿って風が流れる、すなわち n を地表の垂直単位ベクトルとすると $(F\phi) \cdot n = 0$ となるように決定する。

2-2 汚染物質の拡散計算

汚染物質の輸送ならびに拡散は汚染物質が完全に空気流に乗りしかも消滅しないとすれば一般に速度輸送を含めた乱流拡散方程式で記述される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \cdot (VC) + F(D_{EDD}VC) + q_s \quad \dots\dots(8)$$

ここで C は平均的な汚染物質濃度、 q_s は汚染物質の吐出による濃度流量、 D_{EDD} は乱流渦拡散係数である。 D_{EDD} は E_{ref} を地表からの高さ H_{ref} で V_{ref} の風速の大きさに対する乱流渦拡散係数、 E_{yz} を風向に垂直な面内での拡散の重みとすると

$$D_{EDD} = E_{ref} \cdot E_{yz} (|\mathbf{V}|/V_{ref})(h/H_{ref})^S \dots (9)$$

で示される¹⁾⁵⁾。但し、 S は大気安定度により定まる指数値である。また、 E_{ref} および E_{yz} も大気安定度の関数である。

Sklarew 法を使用すると(8)式は

$$\nabla \cdot (\mathbf{V}_m C) = -\frac{\partial C}{\partial t} + q_s \dots (10)$$

の連続の式に変形できる⁶⁾。

但し、 \mathbf{V}_m は

$$\mathbf{V}_m = \mathbf{V} - (D_{EDD}/C)\nabla C \dots (11)$$

(10)式を有限差分化する

$$C_{ijk}^n = C_{ijk}^{n-1} + (B_i/\Delta x + B_j/\Delta y + B_k/\Delta z) + q_{s,ijk} \dots (12)$$

となる。ここで B_i は

$$B_i = V_{m,i-1} \cdot \Delta t \cdot C_{i-1} - V_{m,i} \cdot \Delta t \cdot C_i \dots (13)$$

i は(5)式で述べた表現法である。

(12)において各メッシュ幅 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ が $V_{m,i} \cdot \Delta t$ に等しくなるように Δt を定めると各メッシュ点から \mathbf{V}_m の各成分により汚染濃度を隣接メッシュに前進的に配分する手順で簡易に $n\Delta t$ 後の汚染分布状態を得る。

発生源からの吐出汚染濃度は次の手法で与えられる。

- 1) メッシュ内の各々の発生源をメッシュ中央に置く
- 2) 発生源からの吐出濃度、吐出速度、吐出流量および発生源吐出口での風速の大きさにより汚染物質が空気流に完全に乗って移動し得る地点を Bosanquet, Carey, Halton の式⁷⁾により算定し、そのメッシュ位置に汚染物質が吐出されたとする。
- 3) 吐出されたメッシュでの濃度は汚染物質がそのメッシュ内に滞在し得る時間 T_{ijk} で吐出される汚染物質質量により決定する。

初期条件ならびに境界条件は

- 1) 最初の各メッシュ内の汚染物質濃度は0
 - 2) 地表表面では $(\nabla C) \cdot \mathbf{n} = 0$
 - 3) 計算領域の側面では $\nabla C = 0$
- に設定する。

2-3 平均地上汚染濃度分布計算

長期間の平均地上汚染濃度を得る手法としては従来より2, 3の方法が用いられているが、各々の気象モードにより定常汚染濃度分布を得、その気象モードの得

たい期間内での出現率で重ね合す方式が簡易である。

本システムでは過去10年以上の気象統計資料に基づき月別、季節別ならびに年間の風向出現率を求め次式により各平均地上汚染濃度 \hat{C}_p を得る。

$$\hat{C}_p = \sum_{i=1}^M C_i W_{pi} \dots (14)$$

ここで M はモードの数、 C_i は各々のモードに対する定常地上汚染濃度分布、 W_{pi} は p の期間別の各モードの出現率である。

3. シミュレータ・システム

シミュレータは地勢データ処理、風向・風速計算および拡散計算の3つに大別される。

図1にシステム全体の構成を示す。

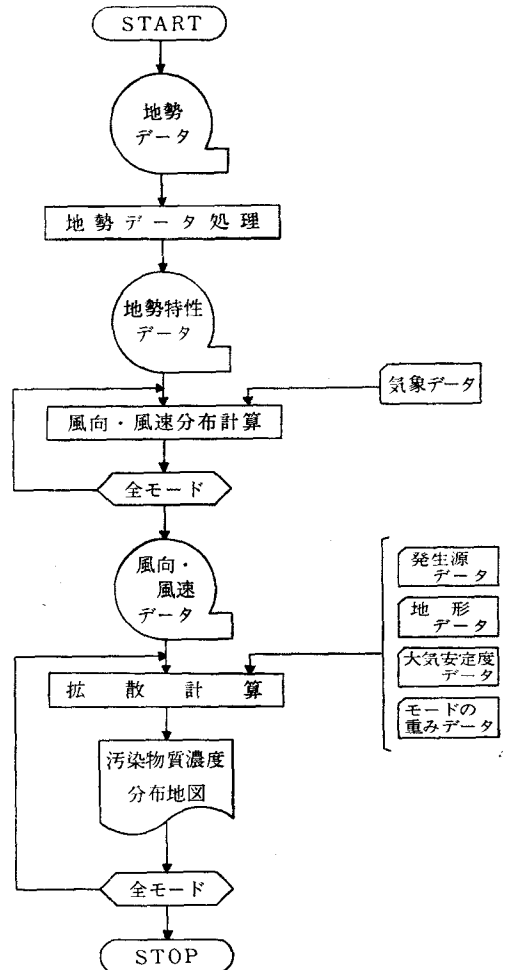


図1 シミュレータ・システムの構成

図2に風向・風速計算についての手順を示す。

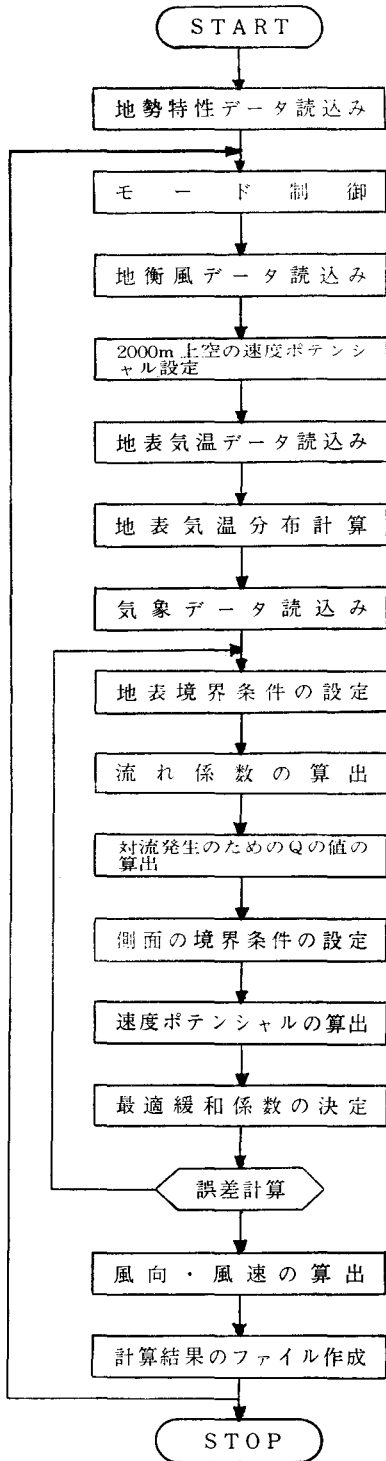


図2 風向・風速3次元分布計算の手順

図3に汚染物質の拡散計算についての手順を示す。

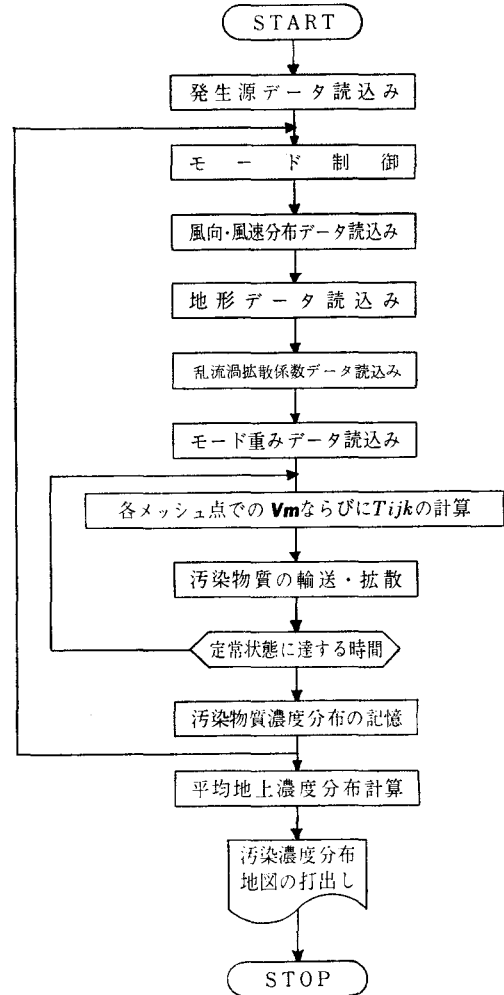


図3 3次元汚染濃度分布計算の手順

本システムは標準FORTRANで記述されており、計算領域を4,000メッシュに区分し、モードの数を8とした場合57KDW以上の記憶容量を有す電算機で処理できる。

4. あとがき

ボックスモデルに基づくモード重ね合せ方式による広域大気汚染シミュレータを現在まで福山地区、呉地区ならびに広島市にケーススタディとして応用してきた。その結果、導電率法による実測値と比較してほとんど良く一致しており、本手法は一応成功を得たと判断される。しかし気象条件によっては差異が生じること

があった。この点については従来汚染物質の発生源に比較的近い領域で用いられてきた PLUME³⁾ ならびにこの改良型の PUFF モデルを併合した複合型シミュレータに改良していくこと、風向・風速計算において最適に設定風向・風速を組み入れる手順を開発すること、収束を精度良く早く行なうようにすること、そして、拡算計算については広い風速値に対し精度良く収束させることの改良が必要である。

今後はこれらの改良を行ない、更に海洋汚染に対しても応用していく予定である。

最後に本研究を進めるにあたり多大なる御協力をいただいた木原厚二（現在株式会社デンケイ）、温品政典（現在株式会社システムコア）、岩崎正和（現在株式会社応用システム研究所）の諸氏ならびに本学電子工学科学生岡崎和夫君をはじめとする研究室の諸君に心より感謝いたします。

Reference

- 1) R. B. Lantz, K. H. Coats and C. V. Kloepfer; Air Pollution Turbulence and Diffusion Symposium, Dec. 7-10, 43/49 (1971)
- 2) 藤本武助：流体力学、p. 232 養賢堂（1970）
- 3) F. Pasquill; The Meteorological Magazine, **90** (1963), 33/49 (1961)
- 4) G. D. Smith; Numerical Solution of Partial Differential Equation, Oxford Univ. Press (1965)
- 5) 通産省 APCS 研究会：計測と制御, **9**(4), 910/920 (1970)
- 6) R. C. Sklarew, A. J. Fabrick and J. E. Prager; Journal of the Air Pollution Control Association, **22** (11), 865/869 (1972)
- 7) C. H. Bosanquet, W. F. Carey and E. M. Halton; Proceeding of Institute of Mechanical Engineering, **162**, 355/367 (1950)
- 8) C. H. Bosanquet and J. L. Pearson; Trans. Faraday Society, **32**, 1249/1264 (1936)

1) R. B. Lantz, K. H. Coats and C. V. Kloepfer;