

大気汚染予測手法

Prediction of Air Pollution

A prediction method of air pollution mainly caused by sulphurous acid gas is discussed.

The pollution phenomenon has a complex multi-phase structure, each phase requiring its own method of prediction. Pointing to this fact the author also reviews those methods of prediction which have hitherto been used making some reference to the author's statistical study and simulation study using physical models, and citing suitable methods of prediction and model study for each type of pollution or each type of prediction purpose.

This article will clarify the concept of "model" in the study of pollution prediction and suggest a direction in which future model studies will proceed.

船橋誠壽* *Motohisa Funabashi*

塩谷 真* *Makoto Shioya*

坂西 剛** *Tsuyoshi Sakanishi*

春名公一* *Kôichi Haruna*

1 緒 言

イオウ酸化物による大気汚染状況の予測が、いくつかの地方で実行あるいは計画されている。イオウ酸化物による汚染は、低イオウ化などの政策が効を奏し、一部では下降きみといわれている。しかし、大気の質が回復したというにはほど遠く、さらにイオウ酸化物が工場排ガスによる大気汚染状況の一つの重要な指標であること、また他物質たとえば窒素酸化物、オキシダントなどの予測において基本的な考えを与えるという点で、この予測を行なうことは依然として重要な課題と考えられる。

ところで汚染予測の目的とはいったいなんだろうか。これは、汚染による被害を未然に防止するということであり、具体的には被害防除のための適切な手段を選択するためといえよう。

古来、予測の最も原始的な方法は、結果に対するなんらかの先行き指標を見いだすことであった。そして今日では社会のあらゆる面で予測の重要性が認識され、種々の予測手法が考えられるに至っている。しかし、ここで対象とするのは特定地域の大気汚染という純然たる物理現象である。したがって予測値の算出のしかたは決定論的あるいは確率論的であったとしても、その方法は、

(1) 汚染の原因の選択とこれらの因果関係(モデル)の把握(はあく)——モデリング

(2) 求められた因果関係を基盤に、原因を想定することによって結果である汚染を推察する——シミュレーション

という二つの過程を経るのが最も適切であると思われる。

この過程を実行するうえで、シミュレーションは電子計算機の急速な進歩によってきわめて容易なこととなり、汚染予測においてはモデリングが最も重要な課題となっている。今日までにもいくつかのモデル(その中の大半は原因結果の関係がきわめて単純な形で与えられているために、シミュレーションという語句は不適切であるが)が提案されているが、これらを大きく分類すると、

(a) 物理モデル (b) 統計モデル

に分けられる。この二者の区別は、前者が現象をなんらかの物理的仮説に基づいた先験的構造によって表現しようとするのに対して、後者は原因と結果のみから現象を表現しようとする点にある。この二つの方法は、はっきりと区別されるものではない。物理モデルであってもその中のパラメータは純粹に統計的な処理のみによって定められてしまうことも多い。

大気汚染という現象には、小は人間程度のメートル・オーダのスケールから、大は大規模気象の数百キロメートル・オーダのスケールまでのきわめて広い範囲にわたる数多くのものが、複雑にからみ合っていて含まれている。このような状況においては、どのようなタイプのモデルが最も良いというものではなく、それぞれの目的・対象に応じてモデルを作成してゆくことが必要である。

大気質の急激な劣下という深刻な情勢を反映して、今日までに種々なモデルが多数発表されている。しかし、これらの結果をどのように利用するかという点ではきわめて混沌(こんとん)とした状態にあり、目的・対象に沿ったモデルの評価は必ずしも十分になされていないように思われる。本稿においては、汚染予測においてその基本構造であるモデルが最も重要であると考え、従来発表されたモデルを目的・対象という面から整理してみる。

2 大気汚染プロセス

本章では、モデルを整理するに先立って、現象規模およびこれを支配する気象因子について概観する。

2.1 現象規模

汚染予測の対象は、大きくいて次の2種類に分割して考えることができる。一つは1個ないしは数個の排出源による比較的局所的な汚染であり、他の一つは多数個の排出源による広域的、たとえば都市全体の汚染である。一見、後者は前者の重ね合わせで表現できるように考えられがちであるが、これは第1近似的なも

表1 対象別にみた時間・空間スケールの相違

対 象	象	時間の扱い(オーダ)	空間の扱い(オーダ)
1 排出源による局地的汚染	低排出源による汚染	静的(h)	均質(～100m ²)
	高排出源による汚染	静的(h)	不均質(～1km ²)
多排出源による広域的汚染	単一物質による汚染	静的(a)または動的(h)	一様または不均質(～10km ²)
	複合汚染	動的(h)	不均質(～10km ²)

* 日立製作所中央研究所 ** 日立製作所システム技術本部

のでしかない。なぜなら前者の場合には排出量の絶対量が小さく、したがって汚染地域が局所であるため現象を静的に扱ってもそれほど誤差が生じないのに対し、後者の場合には排出総量が大きく、しかも汚染地域が広域化しているために汚染物質が大気中に蓄積されるという考え方をしなければならないからである。上のような観点から対象を分類し、その対象把握に適切と思われる典型的な時間、空間の扱いをまとめると表1のようになる。

2.2 汚染質の運動

汚染質の運動を定める要因としては、輸送、拡散、変質、消失がある⁽¹⁾といわれているが、この中で定量的な把握が不完全ながらもなされているのは輸送、拡散の二つである。

輸送は、大気が汚染質を「風下」へ運ぶという汚染質に作用するいちばん明白な現象である。汚染を引き起こす風速には、2m/s以下のものと6m/s程度のものがある。大都市においてよく見られる汚染は前者の場合で、弱風汚染といわれるものである。一方、新産業都市などにおいて高煙突から排出された汚染源によって発生するのはおもに後者の場合で、迅風汚染と呼ばれている。汚染地域の広さと、風速の大きさを考慮すると、弱風汚染の場合には累積効果が大きく汚染に作用するし、迅風汚染の場合には現象を静的にとらえても十分であることが推察される。

拡散は、汚染質に働く不規則な力によって生ずる輸送現象である。観測の時間スケールを短くすれば、不規則と見られる力も、ある力学法則に従っていることがわかることから明らかなように、もともと拡散と輸送とは分離しうものではない。拡散の強さは、単位時間あたりに物質塊(かい)の表面積がどれだけ広がるかということによって表わされる。ある計測によれば、これは $10^{-2} \sim 1m^2/s$ といわれている。この数値から、一つの排出源による局所的な汚染を考える場合には、拡散がきわめて重要な要素と考えられるが、広域的な汚染では短い時間スケールで輸送を考える限り拡散効果は無視しうることとなる。ただし、これは水平方向の拡散についてであって、垂直方向に関しては広域的な汚染

においても拡散を重視しなければならないことはいうまでもない。

2.3 大規模気象

輸送・拡散プロセスは、風の場合とその乱れとがそれぞれの要因となっている。図1に示すように大気汚染に影響する風の場合は、 $10^2 \sim 10^4 km$ の広がり(シノプティックスケール)での気圧分布によって定まる傾度風と、 $1 \sim 10^2 km$ 程度(メソスケール)での熱の輸送によって生ずる海陸風や山谷風などの局地風とが組み合わさってできる。また風の場合の乱れは大気の熱的不均衡や地形、建物などの幾何学的構造の影響による $1 \sim 10^2 m$ 程度(ミクروسケール)での大気運動の熱的もしくは力学的な乱れである。大規模気圧分布は大気の熱力学的性質を決める大規模気温分布や大規模水蒸気圧分布などと相互に影響し合い、全体として季節風、高・低気圧、前線帯などの大規模気象を決定する。特に大規模気温分布や水蒸気圧分布の影響は具体的には雲という形で現われ、それが日射量に変化を与え、局地風の発達や風の場合の乱れに強く作用する。

このように大気汚染は汚染質の輸送・拡散を通じて大規模気象と深く結びついている。広域汚染が起こるのは、対象地域の気圧から汚染質が逃げ出しにくいときで、これは、弱風、大気が安定で対流が弱い、降雨がない、という気象条件によりもたらされる。この条件を満足する典型的な大規模気象の例は移動性高気圧の後面である。後面では上昇気流があるので曇っており日射が比較的弱いことが多いため、海陸風などの熱に起因する風の場合が弱く、また逆転層がくずれにくいという理由による。また移動性高気圧の前面では下降気流があって晴れているため、夜間には放射冷却が起こり地表付近($1 \sim 10^2 m$)に強い接地逆転層ができ、大気が安定になりやすい。このように、移動性高気圧前面、帯状高気圧、季節風がゆるむとき、前線、低気圧前面、二つ玉低気圧の間なども上記気象条件をある程度満たすことが多く、広域汚染を起こしやすい大規模気象の例となっている。

これに対し、迅風汚染が起こる大規模気象は、一定風向が持続する季節風、前線、低気圧の場合に多い。

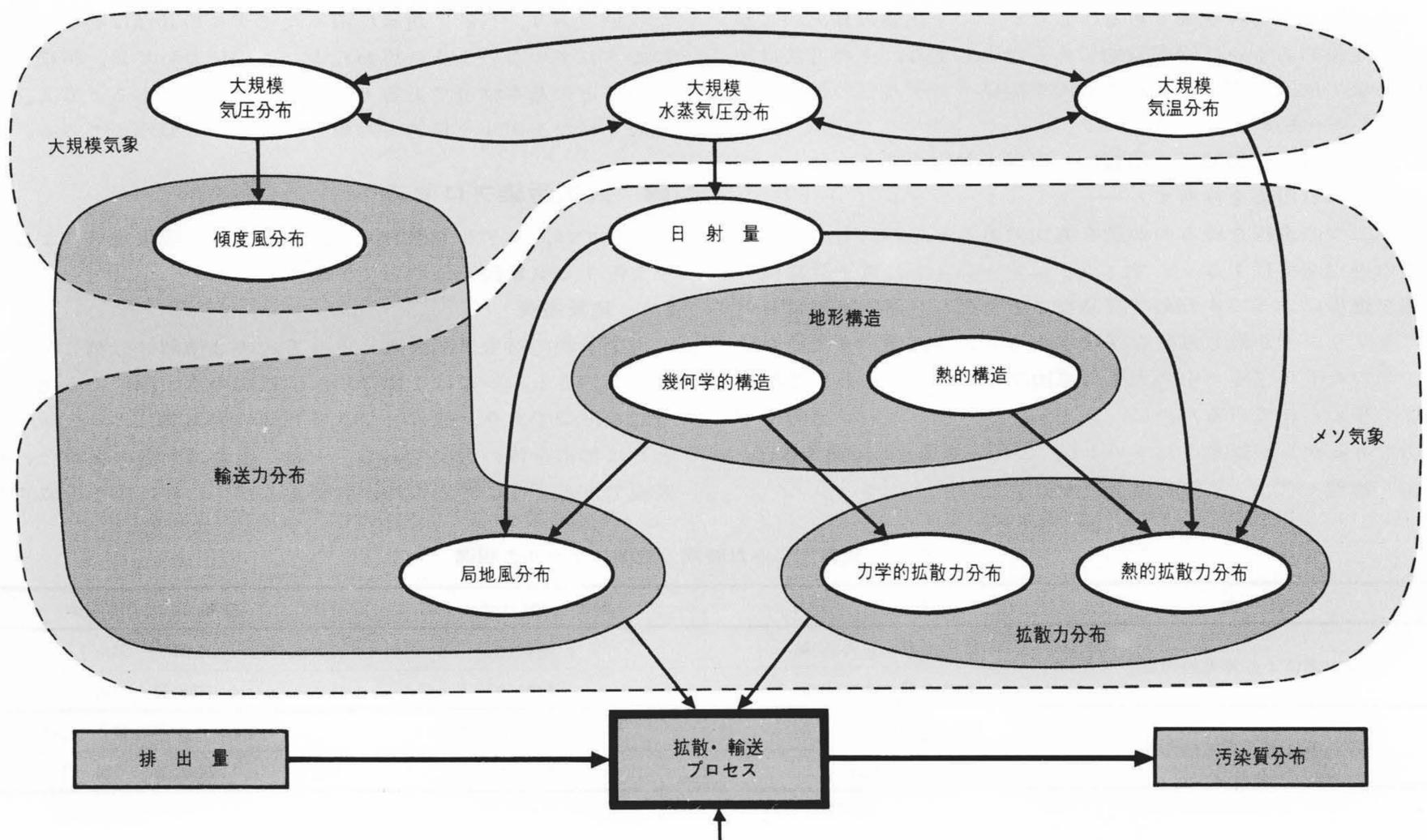


図1 汚染質分布に作用する要因関連図

3 統計的予測

物理モデルが、汚染質の拡散、輸送などの物理現象に基づいて排出源と、汚染濃度との因果関係を表わすのに対して、統計モデルは、物理現象をブラックボックス化して、汚染質の拡散などに重要な影響を与える気象因子と濃度の関連をつけるものである。

統計モデルは、過去の測定データに基づく関係上、将来の排出源状況の変更などによる影響を予測するような計画策定には用いることはできないが、一つの都市全体の短期的（1日先程度）な高濃度ポテンシャルを予測する目的に使用される。

さらに、物理モデルによって、定量的な予測を行なう場合にも、メソスケールの風の場の予測をはじめ、拡散パラメータと関連のある気象因子の予測が必要となるが、これらの情報を得るためには統計的手法を用いることが有効であろう。

統計モデルが、取り扱わねばならない気象因子は、風向、風速、日射量、気温などきわめて多変量となると同時に、単に数値のみでなく、気圧配置、前線の有無など、パターンとして扱わねばならないものが多く、多変量でしかも、パターンの変量の統計処理が必要となる。

ところで現在、各地方自治体で実施されている大気汚染の監視および規制は、「スモッグ情報」、「スモッグ注意報」および「スモッグ警報」というように、汚染の程度によって段階分けして行なわれており、将来の汚染の程度をそのポテンシャルで表わす考えが適用されている。このポテンシャルの予測は、要因分析⁽²⁾といわれる手法を適用すればある程度可能である。以下に、汚染ポテンシャル予測を要因分析2を用いて行なう例について述べる。

實際上、汚染濃度がある段階に入った裏には、風向、風速、気圧配置、雲量、気温垂直分布などさまざまな要因がからみ合っている。そして各要因には、風向はNE~NWの間、風速は2m/s以下というように該当するカテゴリがある。要因分析2ではまず表2のような要因パターン表を作成する。本表は、まず大気汚染度に関するデータを最左欄に濃度の段階によっていくつかのグループに分類しておき、次に過去の汚染濃度と汚染要因の測定データに基づき、各要因の該当するカテゴリにチェックを与えることによって作成する。要因分析2は、この要因パターン表をもとに、ある基準のもとに各要因の各カテゴリに汚染濃度への寄与に応じた適切な重み (a_{ji}) を与えるものである。

適切な重みは、各汚染濃度グループを特色づけるように与えられる。それには、データごとにチェックのしてあるカテゴリの数値の総和をとったとき、その総和に関するグループ間分散（外分散 σ_b^2 ）の、全体の分散（ σ^2 ）に対する比（ η :相関比）が最大になるように、 a_{ji} が決定される。この相関比は、グループ分けがどの程度有効であるか、すなわち、段階分けした各濃度グループが種々の要因により、どの程度区別できるかを示す値である。

重みがあらかじめ計算されると、要因（たとえば、予測対象日の前日夕刻の気象情報など）が与えられれば、その一次結合が作られ、その値によって予測変数である汚染濃度がどのグループに属するか判別され、そのグループが翌日の汚染の程度の統計的予測となるのである。

以上、要因分析2を汚染ポテンシャルの予測に用いる場合について述べたが、パターン表の最左欄の濃度カテゴリの代わりに、風速、風向などのパターンをとれば、対象領域のメソスケールの風の場の予測を行なうことになり、後述する物理モデルに必要な情報を提供するであろう。

4 物理モデルによる予測

本方法は、物理的な観点からのモデルを作り、モデルの入力を適宜に想定、予測することによって汚染強度を算出するという方法である。

一般に、実際の現象すべてが、数式によって完全に記述されるということは、とうてい期待できない。予測目的に対して二次的な要因は、パラメータで代表させてしまうのが実際的である。このため、基本的な構造は物理的考察から求められたとしても、モデルのパラメータはその入出力に対応するデータから統計的に求められることがしばしばである^{(3),(9)}。

しかしながら、このような手法を適用したとしても予測の成否の根本的な部分は基本とするモデル構造に全く依存している。以下においては、物理的な考察の下に求められたいくつかのモデルについて述べる。

4.1 定常モデル

この種のモデルは、1個あるいは数個の排出源による比較的狭い領域の汚染予測に用いられる。この中の一つは、大気汚染においてよく知られたSuttonモデル⁽⁴⁾などに代表されるプルーム・モデルである。このモデルでは図2のように煙突より排出された汚

表2 大気汚染予測要因パターン表

濃度 カテゴリ	カテゴリ の内容	カテゴリ 番号	重み	X ₁ (高気圧)				X _J (風向, 風速)					X _R (気温鉛直分布)		
				X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X _{J1}	X _{J2}	X _{J3}	X _{J4}	X _{J5}	X _{R1}	X _{R2}	X _{R3}
				高の 気前 圧面	中 心	後 面	そ の 他	2m/s 未満 NE~NW	2m/s 未満 NW~SW	2m/s 未満 SW~SE	2m/s 未満 SE~NE	2m/s 以上	て い 減	中 立	安 定
				a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a _{J1}	a _{J2}	a _{J3}	a _{J4}	a _{J5}	a _{R1}	a _{R2}	a _{R3}
I	0.2ppm以上	1													
		2													
		3													
		・													
		・													
		・													
		・													
T	0.15ppm未満	・													
		・													
		・													
		・													
		n													

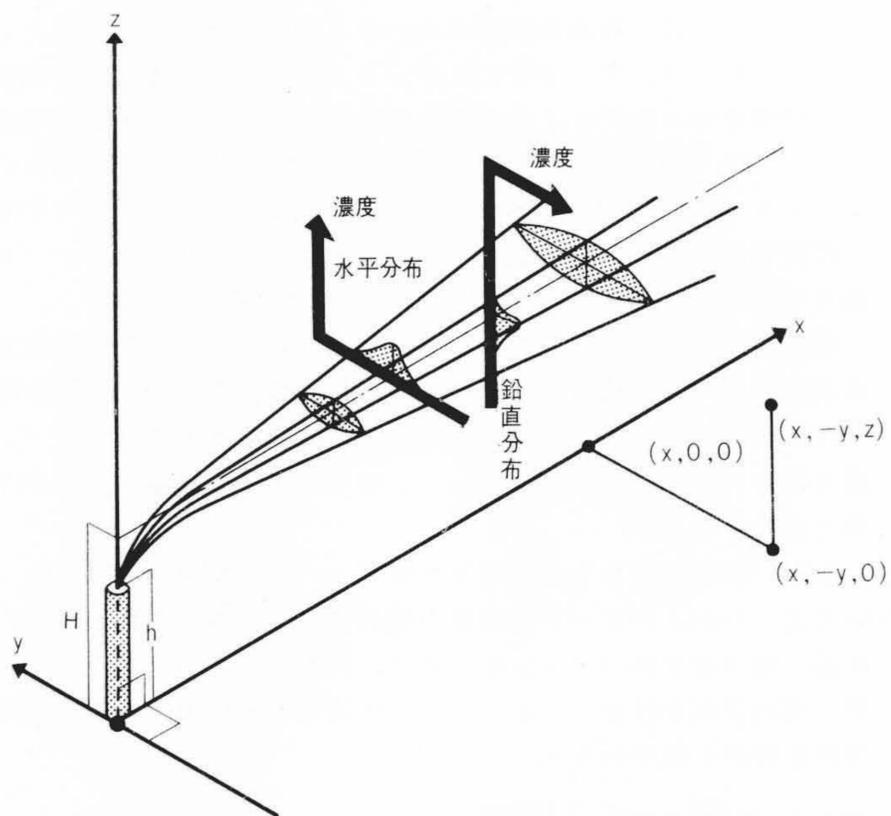


図2 ガウス形ブルーム構造の図解

染質は高度Hの位置まで上昇し、その後は風下方向にある定められた分布（この汚染質の流れはブルームと呼ばれ大部分のモデルではガウス分布と仮定されている）に従って拡散すると考える。モデル計算において用いられる入力は次の三つの条件を与えるものに分類される。

- (1) 分布形状：拡散係数
- (2) 相対的位置関係：排出位置、濃度算出点位置
- (3) 絶対量：排出量、風速

このモデルが適用できるのは、風分布および拡散力分布が一様な場合に限られているため、排出源から数キロメートル以内のごく狭い領域である。したがって、比較的小規模な低排出源による汚染予測に利用される。

一方、地形が平らでなかったり、排出位置が高かったりして風分布などが一様とは考えられない場合のために、新たな方法が日野⁽⁵⁾によって提案されている。この方法は地形条件および上層風などから風分布を算出し、これを用いて拡散方程式を数値的に解き、汚染分布を求めるというものである。

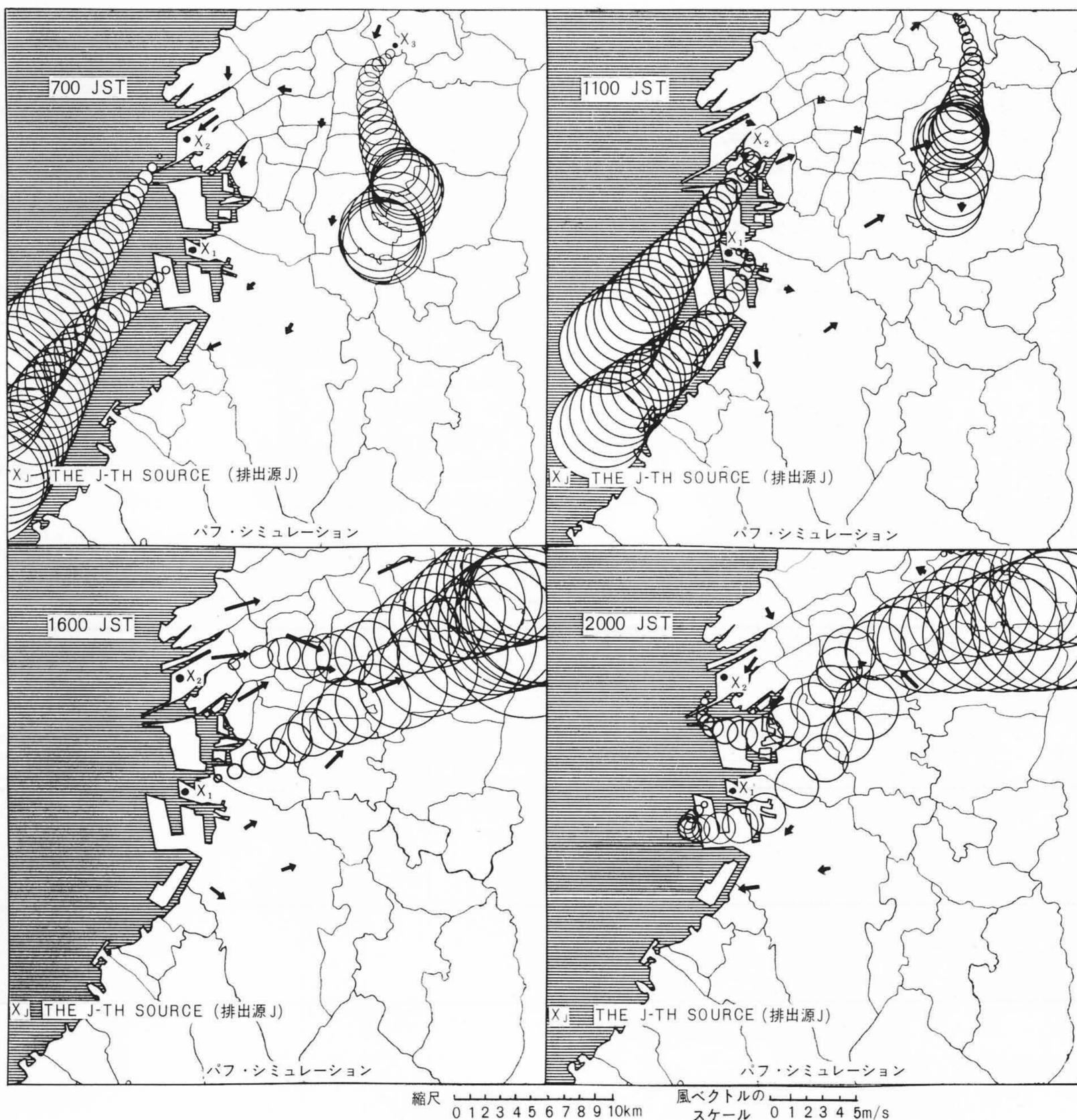


図3 海陸風の場合における汚染質分布

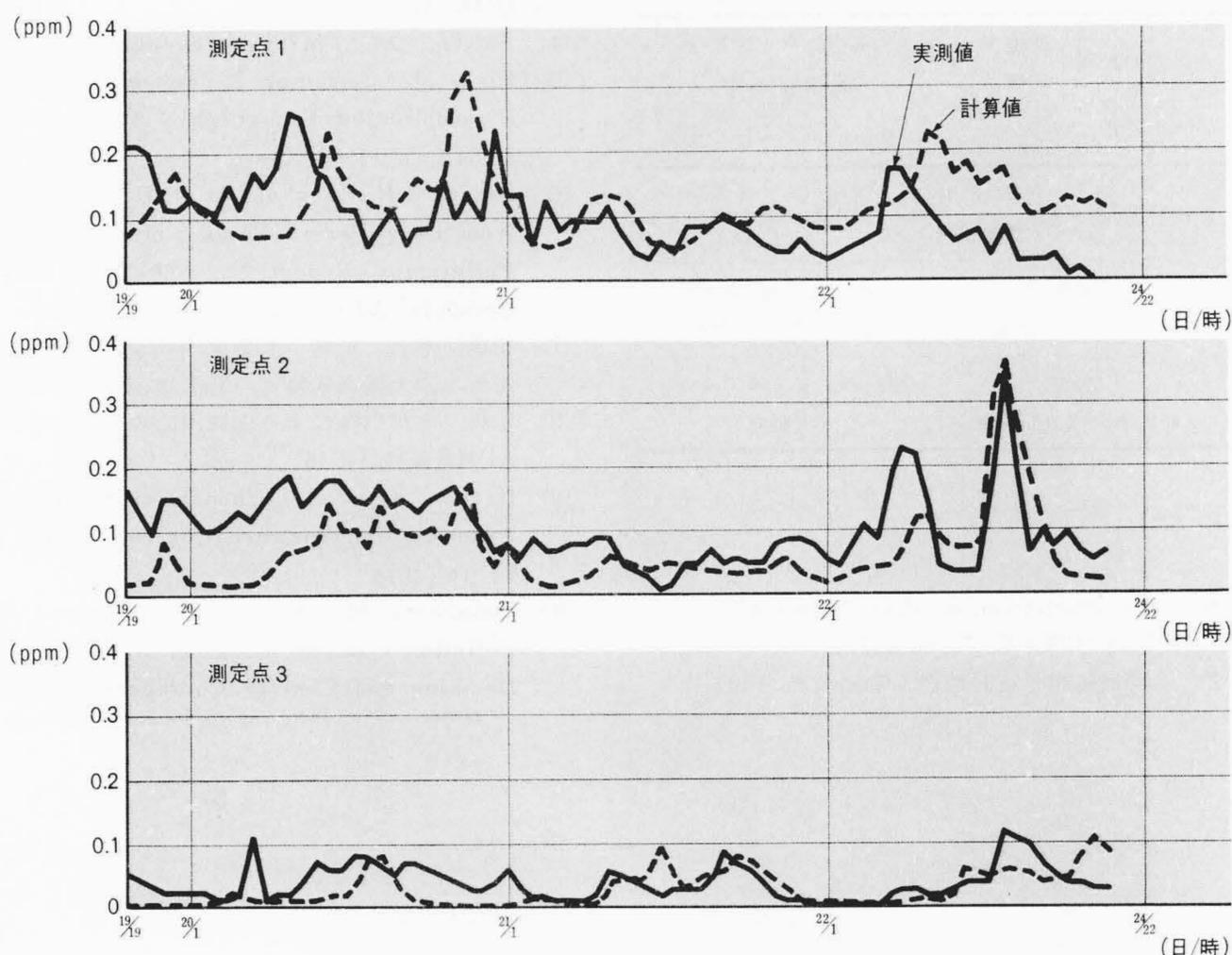


図4 都市形汚染モデルによるシミュレーション結果 (昭43-11)

4.2 動的モデル

大都市において発生する汚染が、弱風汚染であることを考えると、都市汚染の予測のためには静的なモデル計算の結果の単なる重ね合わせだけでは第1近似的な意味しか持たないことは、前述したとおりである。このため、なんらかの形で動的な現象をモデルに取り込むことが必要となってくる。

都市上空の大気が、どれくらいの時間区間にわたって滞留するかということを知るために、シミュレーションを行なった例は図3に示すとおりである。これは、ある地方において実測された海陸風の場合での蓄積効果を調べたもので、仮想的な3個の排出源から排出される汚染質を15分間隔でサンプリングして平面的にその分布形状を追跡している。図中の円はパフと呼ばれるもので、サンプルされた汚染質の持つ分布の標準偏差の3倍を半径として描かれたものである。これらは各排出源ごとに、7時間前に排出されたものまでが表わされている。図から、陸風時(700JST)あるいは海陸風交替時(1100JST)においては7時間、あるいはそれ以上にわたる蓄積現象が見られる。特に、海陸風交替時にはいったん海上に流出した汚染質が押し戻され、これが汚染発生の大きな原因になっていることがわかる。

このような非定常な場で発生する汚染を予測するためのモデルとして、パフ・モデル⁽⁶⁾がアメリカにおいて開発された。図3もこのモデルを用いてシミュレートしたもので、この方法によれば非定常の場合での汚染質の運動をよく追跡できることが推察される。しかし、本方法は連続体を離散化しているために多数の排出源から排出された汚染質の分布を求めるには膨大な計算労力を必要とする。さらに、個々の実態をとらえられないような、長時間にわたって滞留するパフを計算することは、非常な危険性を含んでいると思わねばならない。

上のような問題点を打開するため、都市形汚染モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

と呼ばれるモデルが新たに開発されている。このモデルでは、実際の濃度分布はバックグラウンドに分布する汚染質と、明確なブルームを形成する汚染質との和によって定まると考え、パフ計算とバックグラウンド濃度計算とを汚染質の分布形状に応じて適宜に適用するという方式をとっている。バックグラウンド濃度という考えを導入することにより、計算量は減少され、またパフ・モデルに見られる実態としてとらえられないものの計算は除外されているという点で、本モデルは都市域において発生する弱風汚染予測に適切なものといえよう。図4はこのモデルによるシミュレーション結果の例を示したものである。この例では、従来むずかしいとされていた都市における高濃度現象をきわめてよく表現しているように思われる。

本モデルを、大気受容能力を算定するための実際的なモデルに改良するよう検討が進められている。

5 結 言

大気汚染予測においては、方法論的には二つのアプローチ、すなわち決定論的方法と確率論的方法とがあるにしても、その前段階である基本モデルの作成が最も重要であるという立場から、予測のためのモデルを概観した。

モデルは、対象とする現象と予測の目的によって適宜選択されねばならない。このような観点から、いくつかの標準的な目的・対象から適切と思われるモデルを列挙すると表3のようになる。

今日までに、多くの拡散専門家のたゆまぬ努力によって、小規模な汚染予測は解決の方向にある。今後は、広域的な汚染の予測に力を注いでゆかねばならない。

筆者らが、大気汚染予測という貴重な仕事の一部に携わるにあたって、終始ご指導、ご鞭撻(べんたつ)いただいた京都大学工学部 榎木義一教授、ならびに高松武一郎教授に対し深く謝意を表す。

表3 目的・対象からみた代表的モデル

対 象	目 的	モデル(開発者)
1 排出源による 局地的汚染	立地計画 { 低煙源 高煙源	ブルーム・モデル (Sutton) 数値解(日野)
	広報・制御 (前日または当日早朝)	統計的チェックリスト
多排出源による 広域的汚染	地域計画(燃料) { 年 平 均 異常検出	ブルーム・モデル 都市形汚染モデル (日立)
	制御 (時間単位の排出規制)	高松モデル(京大) 都市形汚染モデル
	広報 (前日または当日早朝)	統計的チェック・リスト (大阪府)

参考文献

(1) Report on Models for Prediction of Air Pollution : O.E.C.D. Document DAS/CSI/A, 70.86(1970)
 (2) 林知己夫, ほか2名 : 情報処理と統計数理 : 産業図書 (昭45)
 (3) Takamatsu, T., et al. : Computer Control System for Air Pollution Prevention : Presented to the 4th Congress of IFAC, Warsaw (1969)
 (4) Sutton, O.G. : Micrometeorology : McGraw-Hill (1953)
 (5) Hino, M. : Computer Experiment on Smoke Diffusion over a Complicated Topography : Atmospheric Environment, Vol. 2, 541-558 (1968)
 (6) Start, G.E., Markee, Jr. E.H. : Relative Dose Factors from Long Period Point Source Emissions of Atmospheric Pollutants : Report No. N68-38380, Environmental Science Services Administration, 59-76 (1968)
 (7) 船橋, 春名, 尾崎 : 多排出源による広域汚染のシミュレーションモデル : 大気汚染研究, Vol. 6, No. 1. (昭46)
 (8) 船橋 : 多排出源による広域汚染のシミュレーションモデル, APMS資料 (昭46)
 (9) Haruna, K, et al : Exponential Smoothing for Practical Adaptive Feed-forward Control, IFAC Kyoto Symposium, Kyoto (1970)
 (10) Funabashi, M, et al : A Mathematical Model for Air Pollution Control in Urban Areas, Proceedings, IEEE Decision and Control Conference, Miami (1971)



特 許 の 紹 介



特許第468151号 (特公昭39-25887号)

奥本武臣・飯島史郎・蜂須幹雄・斉藤親徳

球 状 黒 鉛 を 含 む 鋳 鋼 ロ ー ル の 製 造 法

圧延ロール用材料は靱(じん)性の強いこと、摩耗しにくいことおよび熱衝撃によってき裂を生じないことが必要である。これらの性質を高めるために一般にニッケル、クロム、モリブデン、バナジウムなどの元素を合金化させるが、鋳鋼製のロールでは微細な球状黒鉛を均一に分布析出させることで、上記性質がいっそう高め得ることを見いだした。

この発明は過共析範囲以上の溶鋼にチタン族元素を微量添加し、チタン族元素の脱ガス、黒鉛化促進および結晶の微細化作用を利用して微細な球状黒鉛をマトリックス中に分散させたことが特徴である。

製造工程としては、まず溶鋼にニッケル、クロム、モリブデン、バナジウムなどの元素を加え、次いで適当な溶解処理によって低イオウ、低酸素組成にし、その後チタン族元素の1種または2種

以上を微量添加する。溶鋼を低イオウ、低酸素組成にするのはチタン族元素の添加効果が妨害されるのを緩和するためである。

この発明を炭素1.6%、ケイ素0.8%、マンガン0.7%、リン0.01%、イオウ0.01%、ニッケル3.0%、クロム1.0%、モリブデン0.3%、バナジウム0.1%の鋳鋼に対して実施したところ、機械的性質は鋳放しで引張強さ50~60kg/mm²、伸び0.5~0.8%、衝撃曲げ強さ0.4~0.6kg^{-m}/cm²、ブリネルかたさ360~380であった。これを熱処理したものは引張強さ70~80kg/mm²、伸び2~3%、衝撃曲げ強さ約2kg^{-m}/cm²、ブリネルかたさ230~250であり、従来のこの種鋳鋼ロール材より引張強さおよび衝撃曲げ強さにおいてすぐれていることが確認された。また、各種熱間圧延用ロールに適用した結果もすこぶる良好であった。(鈴木)