中国・天津市における硫黄酸化物大気拡散と被害予測

Diffusion Simulation of Air Pollutants and Damage Prediction due to SOx in Tianjin

武本行正，岡良浩，鬼頭浩文，大倉克己
四日市大学環境情報学部，三重県四日市市萱生町 1200，〒512－8512, takemoto@yokkaichi-u.ac.jp
Yukimasa TAKEMOTO, Yoshihiro OKA, Hirobumi KITOU and Katsumi OOKURA
Faculty of Environmental and Information Sciences, Yokkaichi University,
1200 Kayou chou, Yokkaichi City, Mie Prefecture, 512-8512, Japan

In China, although installation of dust collectors to capture airborne particulates has to some extent advanced the battle against air pollution, desulfurization and denitration of SOx and NOx are almost never performed. This situation is nearly identical to that in which the problem of Yokkaichi Asthma arose. Therefore, adverse health effects such as the respiratory system diseases caused in Yokkaichi are anticipated as well.
We have already studied, from an economic viewpoint, the relation between investments to prevent pollution and damage to health the case of Yokkaichi City. This subsequent research ultimately gave rise to an interdisciplinary model integrating engineering techniques such as air-diffusion simulation with estimation of damages in an economic cost-benefit analysis.
This study examines the possibility of sustainable development by applying these techniques in Tianjin, China, and clarifies the relationship between investments in pollution prevention and the costs of the damages caused by pollution.

１．四日市公害の教訓と天津との SO_2 排出水準の比較

四日市公害は、公害を克服したわが国の典型的事例といわれることが多い。総量規制を契機に開発・導入された排煙脱硫装置の設置とともに、SO_2 排出量が急激に減少した。しかし公害認定患者は SO_2 濃度が急激に下がったあとも急激に減ることはなかった（図１）。また、排煙脱硫装置の設置には莫大な投資がかかり、ピーク時には地域純生産（NDP）の 10.0%近くにも達した（図 2）。

天津市の 1999 年の SO_2 濃度は、0.068mg/m^3 であり、ここ数年少しずつ低下している。四日市では、全市平均の濃度が出されたのは総量規制が始まった 1972 からであり、そのころには SO_2 排出量は半減しているが、その値は 0.058mg/m^3 であり今の天津より良好である。さらに四日市の 10 倍以上にあたる約 370 万人が、四日市市とほぼ同程度の面積に居住しており、その高密な都市構造からも、SO_2 問題の深刻さを推察することができる。

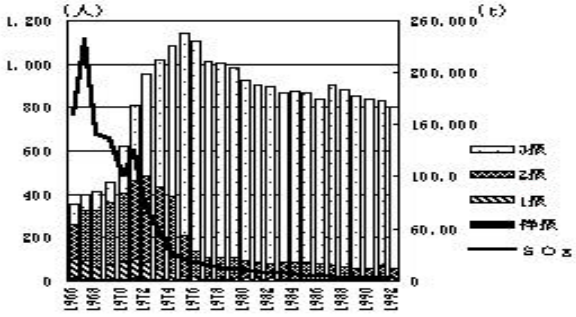

図１　四日市公害の患者発生とSOx排出量

２．拡散計算と被害予測の統合化モデル

このような四日市での SO_2 の減少と健康被害の因果関係を、煙源との関係を反映して SO_2 対策の効果も計測できるようにモデル化した。その統合モデルの概要が図３である。この方法は大きく２つのブロックからなる。

１つめは拡散シミュレーションを用いて、煙源データ（煙源の位置・高さ・各々の煙源の SO_2 排出量）から、当該地域の任意の地点での SO_2 濃度を推計するブロックである。

２つめは、当該地域の各地点の SO_2 濃度から、健康被害の発生を推計するブロックである。これは鬼頭・岡（1998）で行った SO_2 濃度と、「公害健康被害補償法」の等級別認定患者数との因果関係をベースとして、異なる地域での被害者数を予測できるシミュレーションである。ここでは前年度の患者のうち一定割合を当該年度の患者とするという累積的な推計方法をとっている。

このようなモデルを用いることによって、様々な環境対策の結果、どの程度公害患者の発生が抑制されるかをみることができる。またその環境対策の費用と被害額の減少との関係をみることによって、費用便益分析が可能となる。

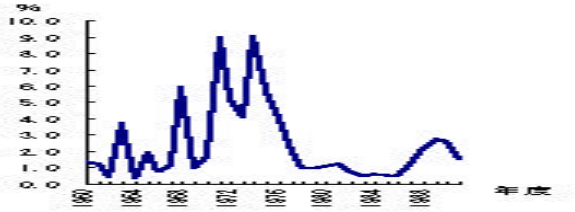

図２　環境関係費用の対ＮＤＰ比率

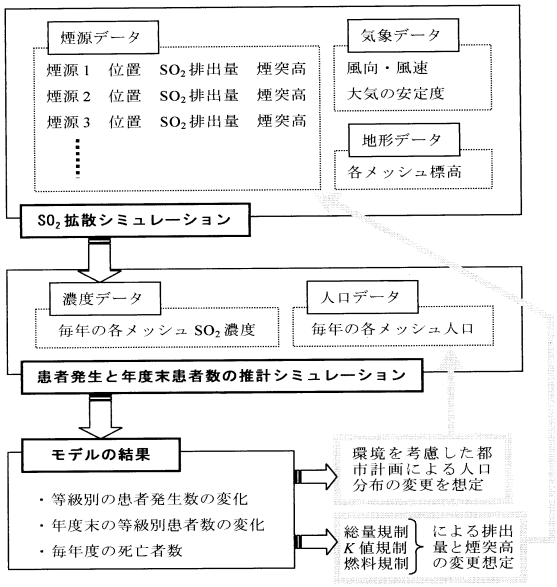

図３　環境政策の効果についての統合モデル

Copyright © 2000 by JSCFD

３．3 次元拡散計算のモデルと着地濃度予測

これまで用いてきた一般曲線座標系の大気汚染濃度計算モデルでは、地面に起伏があったり、丘陵地帯や山脈がある場合、その地形に沿った計算ができる。このような場合にはきわめて有効であるが、その反面、基礎式が複雑になり、簡単に取り扱うには不便である。平坦な地形の時は、3 次元直交座標系での大気汚染濃度計算モデルを用いた解析で十分であろう。そこで、3 次元直交座標系での風速場と拡散場を交互に時間発展的に解くプログラムを開発したので、中国天津市の市内 6 区にある発電所や工場、居住区(生活用や業務用)からの石炭燃焼排煙の拡散を想定して、どの程度の着地濃度になるかをシミュレートした。

３－１．流速場の計算方法

風向と地上 10m での風速値を入力データにして、上空の風速を 1/4 乗則にて推定し、これを初期値として風速場全体を Navier-Stokes の運動方程式にて計算する。このとき、流体としては非圧縮性であるから、各計算格子内で非圧縮条件を満たすように計算を時間発展的に進める。これと同時に 3 次元拡散場の計算も交互に解き、時間発展的に進める形式としている。

３－２．拡散場の計算方法

基礎方程式

3 次元の各格子点での風速場が計算されたとする。これをU（u，v，w）の 3 成分表示で表現すると、汚染拡散物質の濃度をｃで表すとして、以下の時間発展型の偏微分方程式を 3 次元場で差分法を用いて解けばよい。移流・拡散(convection diffusion)の式は、

$$\frac{\partial c}{\partial t}+u\frac{\partial c}{\partial x}+v\frac{\partial c}{\partial y}+w\frac{\partial c}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_H\frac{\partial c}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_V\frac{\partial c}{\partial z}\right)+Q \quad (1)$$

で表現される。ここでの K_H は水平方向拡散係数、K_V は鉛直方向拡散係数であり、また Q は単位時間あたりの汚染物質の発生量である。

拡散係数の設定

まず、水平方向拡散係数 K_H の推定手法について述べる。水平方向の拡散では、拡散幅が時間的にも空間的にもさまざまで、一定の定数とみなすことは難しい。今回の拡散シミュレーションについては従来の点源からの拡散モデルで使用されてきた値、ならびにプリューム・モデルの計算例を参考に拡散幅があまり広がらない値として、一律にすべての時間と空間にわたって

$$K_H = 200\mathrm{m^2/sec} \quad (2)$$

と仮定した。

つぎに、鉛直方向拡散係数 K_V の推定手法について述べる。岡本(Okamoto,1976)は鉛直方向拡散係数の分布を台形分布と仮定し、最大値 $K_{V\,\max}$ となる最大高度を 100 m と設定して、Eschenroeder のモデルを参考にして、安定度により

安定度	Eschenroeder	ケース 1	ケース 2	
強い安定	0.5	—	—	
安定	1	0.5	1	
中立	2	2	5	
不安定	10	5	20	=> $K_{V\,\max}$
強不安定	50	—	—	

を仮定し上記のケース 1 とケース 2 の値を自身の差分モデルに使用している。

また、横山(1992)は強不安定の混合層中の鉛直方向拡散係数について、晴れた日の 24 時間変化を実測値として提示し、最大 50m²/sec 程度であることを図示している。

以上のこれまでの K_V の推定法を参考にして、今回の拡散シミュレーションについては、一律に不安定側の

$$K_V = 40\ \mathrm{m^2/sec} \quad (3)$$

と仮定した。

３－３．汚染物質拡散過程の計算

計算場、SO_2 排出源、風向・風速などの設定

シミュレーション上は、天津市の市街の中心に格子網の中心を置き、ｘ，ｙ，ｚ方向それぞれ 18 × 21 × 32 の等間隔差分格子で格子間隔は水平 1,000 m，鉛直 25 m とした。したがって、市内 6 区をカバーする東西 18 km、南北 21 km、上空 750 m までが計算場となる。汚染物質 SO_2 は、地上の各格子網から継続的に 1,000 m × 1,000 m × 25 m のボックス中に単位時間(秒)ごとに排出されると仮定した。

煙源データについては、第 2 章に示したように、工場からの排出、暖房・炊事などの生活からの排出、業務用(飲食店)としての排出、の 3 つを想定している。工場からの排出については、大量に SO_2 を排出する市内 3 工場と市内 6 区の 11 工業区の SO_2 排出量を推計して煙源としている。生活からの排出については、1996 年の天津市内 6 区の生活用石炭使用量約 120 万トンを 1 人あたりの平均石炭使用量約 324.9 kg で各メッシュに配分し、石炭のヒアリングによるＳ分含有率 1.2 %と転換率 50 %を仮定して各メッシュの SO_2 排出量を算定した。さらに業務用としての排出については、1990 年代前半に推計された中心からの距離帯ごとの面積あたり SO_2 排出量がわかっている。調査年次が古くまた同心円状に飲食店やレストランが分布しているとは考え難いが、データの制約から今回はこのデータを用いて、各格子点ごとの SO_2 排出量を算定している。煙源の高さについては、生活用・業務用と工業区からの排出は鉛直層の下から 2 層目（要するに地上～25 m）とし、3 大工場についてはヒアリングなどから 200 mとした。

拡散計算時の風速は地上 10 m で 3.0 m/sec を仮定した。鉛直方向には、高さの 1/4 乗則(1/4 power law)で上空の速さを推定した。 計算された地上の各濃度分布データは排出開始からそれぞれ 60 分後(3,600 sec×3.0 m/sec＝約 10 km 流下)の結果であるが、風配図上 8 方向の風下側に汚染物質が流下していく状況が計算され、それぞれを実際の年間の風向頻度により加重平均した。また大気安定度Ｃの弱不安定～中立状態での仮定計算である。

さらに、無風状態の地上の濃度は、各煙源や地上から継続して 6 時間（21,600 sec）排出されたとみなして計算した。これも天津市の場合、無風状態は 10 %存在することが気象観測データから判明しているので加重平均して濃度を足し合わせた。

なお、夏季と冬季(11 月中旬から 3 月中旬まで)の排出量の違いについてはデータがないので年平均値として処理した。

排出削減の想定

天津においては、現在 SO_2 の排出削減は実質的に行われていないと考えられる。今回の推計で用いた排出量の削減対策のシナリオは、生活用石炭および業務用石炭からの SO_2 排出量を半減するとともに、SO_2 を大量に排出する 3 つの大規模工場からの SO_2 排出量を 90 %削減するというものである。前者は、生活用・業務用石炭のすべてをブリケッ

Copyright © 2000 by JSCFD

トに転換できたときを想定しており、後者は大規模工場に石灰石膏法の排煙脱硫装置を設置した場合を想定している。これらのシナリオは現段階では現実的にとり得る選択であるという意味ではなく、比較的極端なシナリオを描きその費用と便益をみるための、モデル上の想定である。なお、報告書では、30 年間に渡って患者発生を推計するモデルを構築し、対策のタイミングを変更するシミュレーションを行った。

天津におけるSO_2濃度分布の試算結果

上記の各メッシュごとの SO_2 排出データを用いて、現状での天津市における SO_2 濃度の分布および、削減後の SO_2 濃度の分布をみたのが、それぞれ図５および図６である。（メッシュの地図上の位置は図４に描かれている。）現状の SO_2 濃度は、最大値で 0.19 ppm に達する。これは四日市の環境目標値 0.017 ppm の約 10 倍である。また多くの地域で 0.06 ppm から 0.1 ppm 程度の濃度となっていることがわかる。この濃度は四日市の環境目標値の 3.5 倍から 6 倍である。もし削減対策をした場合、天津市内の SO_2 濃度は 0.02 から 0.06 ppm 程度にまで低下する。この水準は、四日市の環境目標値には達しないものの大幅な改善ができることになる。

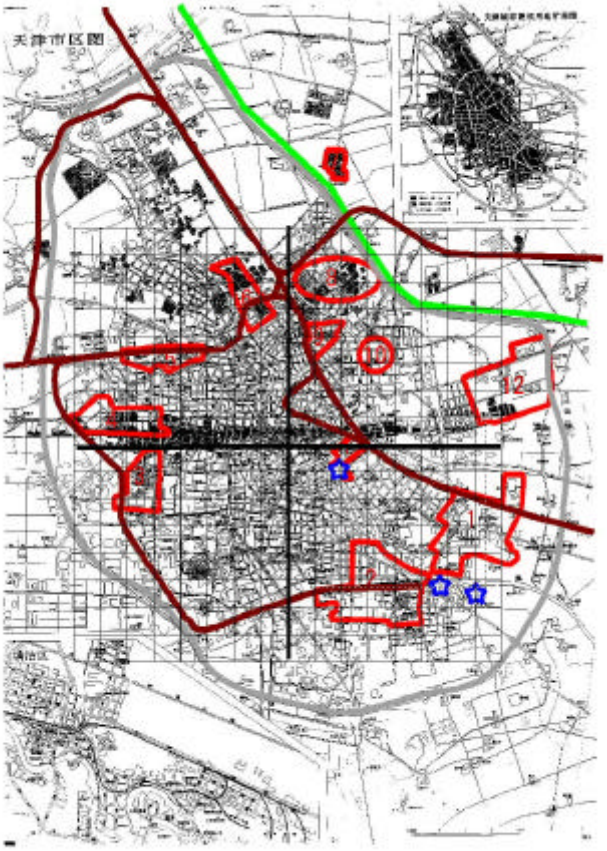

図４　大規模工場および工業区の位置（メッシュ化の原図）

四日市市の SO_2 濃度の経過（単位:mg/m³ に換算）
局所最大値※1　：0.214(約 0.08ppm)
平均最大値※2　：0.058(約 0.022ppm)
日本の環境基準　：0.045
※1　磯津観測局の 1967 年の年平均濃度
※2　1972 年の四日市平均濃度

天津市の平均 SO_2 濃度の変遷（単位: mg/m³）

1992	0.180
1993	0.140
1994	0.160
1995	0.082
1996	0.094
1997	0.075
1998	0.082

単位換算：1ppm=2.63 mg/m³

さて、まず第 1 に中国の都市のなかでは、貴陽、重慶、太原などの内陸部の工業都市において SO_2 濃度が極めて高く、0.3 mg/m³ (0.114ppm) 前後の値を示していることである。この水準を四日市の公害発生当時と比較すると、四日市市における局所的な年平均 SO_2 濃度よりさらに高い水準となっているという驚くべき状況になっていることがわかる。

第 2 に、天津をはじめ、北京・上海などの沿岸部の大都市においても、おおよそ 0.1 mg/m³ 程度の値となっている点である。この水準は内陸部の工業都市ほどでないものの、四日市の最も高かった市全域年平均 SO_2 濃度の約 2 倍程度の濃度となっており、四日市公害当時より深刻であることが推察される。さらに中国では主要燃料が石炭である。したがって、SO_2 だけでなく粉塵の問題も大きいと考えられる。

天津市における年平均 SO_2 濃度を、得られたデータから可能なかぎりの経年変化をみたのが上記の表である。これらは国家管理の 7 地点の SO_2 濃度を算術平均したものである。この経年変化をみると、1994 までと 1995 年以降において、その値が大きく異なることがわかる。社会科学院とのディスカッションの中では、この理由について、工場の郊外移転や、国営企業をはじめとする経済の低迷をあげているが、それにしてもわずか 1 年で、年平均 SO_2 濃度が半減近くにまで減少するとは考えにくい。おそらく分析方法の変更などがあったと考えられるが、文献からはそのようなことを類推する手がかりは得られていない。

なお、天津における石炭使用量の推計結果は、

	天津全体	市内 6 区
発電用	約 600 万トン	約 150 万トン
工業用	約 500 万トン	約 215 万トン
生活用	約 500 万トン	約 120 万トン
業務用	不明	約 250 万トン

Copyright © 2000 by JSCFD

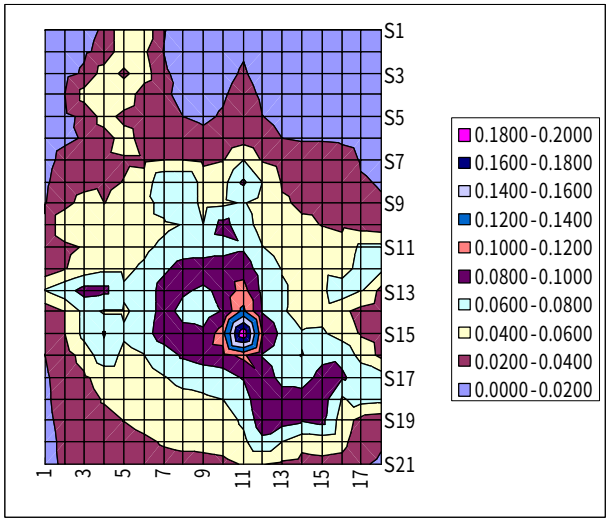

図５　現状の SO_2 濃度分布の予測（単位：ppm）

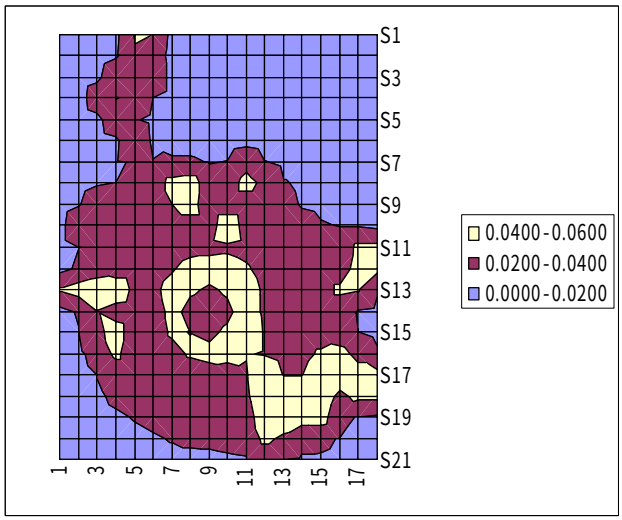

図６　削減対策後の SO_2 濃度分布の予測（単位：ppm）

上記の表のように、市内 6 区において工業用や発電用に用いられる石炭使用量は、約 350 万トン強となっている。このうち大規模工場は数カ所にしか過ぎず、約半分は小規模工場からのものであると考えられ、四日市で経験したような単純な構造ではないことが類推される。また生活用と業務用のもの石炭使用量も発電用・工業用とほぼ同程度であり、無視できない割合である。

したがって、脱硫対策を考える場合、わが国のように発電所や大規模工場の脱硫をすすめる一方で、小規模ボイラーの脱硫や、ブリケットなどの燃料脱硫を検討する必要がある。さらには人口密集地においては工場の移転や燃料転換までを視野に入れた SO_2 対策が必要である。これは一方ではエネルギー問題をどのようにベストミックスさせていくかという問題でもあるが、大気環境という点も加味したベストミックスを考える必要があるということである。

４．環境政策の早期実現に向けて

本研究では、さまざまな社会状況や将来の変化を、最も簡単な仮定をおいて捨象し、排煙脱硫装置とバイオブリケットを天津に導入するという脱硫アクティビティを実施した場合の、費用と便益を概観した。

その結果、今回の脱硫アクティビティの費用と便益の関係は、長期的にみれば便益が費用を上回ることが確認できた。四日市では便益を大幅に上回る費用を投じることが社会の選択だったわけであり、四日市と比較すれば脱硫アクティビティの導入のインセンティブは高いといえる。このことは、経済規模との脱硫アクティビティの関係をみるとさらに明確であり、当時の四日市と比較すれば地域経済に対する負荷も少なく、急激な経済状況の変化を伴わずに実施できる。

しかし、脱硫アクティビティの費用が便益を上回るのは、かなり長い年月を要する。その最も大きな要因は、湿式石灰石膏法による脱硫アクティビティの費用が非常に高いためである。したがってこの費用をどれだけ低くできるかということが重要である。そのためには、まず、現在進められているような簡易脱硫や流動床燃焼など、コストの低い脱硫装置の技術開発が重要である。また脱硫技術の開発以外にも、脱硫費用を低減する方法の検討が必要である。筆者らは現在、脱硫の副産物である石膏を、土壌改良に用いることを検討している。このようなことも費用を低減させることとなる。したがってこのような研究の必要性を、今回の分析においても確認することができた。

【参考文献】

1)岡本真一：大気汚染濃度予測のための調査研究報告書―拡散モデルによる濃度計算の基礎―、（社）産業公害防止協会（1989）

2) 武本，飯島，西垣，朝日 ： 第 3 章四日市公害から学んだ環境保全対策の有効性，「科学技術は地球を救えるか」（橋爪大三郎，新田義孝編著），富士通ブックス pp.61-90 (1995)

3)武本行正，北畠正義，城之内忠正：四日市地域における汚染物質の排出と着地濃度の拡散シミュレーション，四日市大学論集 Vol.9,No.1, pp.263-280 (1996)

4)武本行正，北畠正義：四日市地域における過去の硫黄酸化物大気拡散の数値シミュレーション，第 10 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 pp.310-311 (1996)

5)鬼頭，岡，朝日，武本，西垣，飯島：環境に配慮した開発政策の有効性―四日市公害の計量経済モデル分析―（四日市大学教育研究叢書 6），合同出版 pp.1-77 (1998)

6)Y. Takemoto, M. Kitabatake and S.Chiba: Numerical Prediction of Diffusion Processes of Air Pollutants in Yokkaichi Area in the Past using Generalized Coordinate System, Proc. of the 2nd APCSEET, pp.95-100, (Univ. of Queensland, Australia)(1998)

7)Yoshihiro Oka ：" How to Evaluate the Environmental Problem? – A Case Study of Yokkaichi Petrochemical Industrial Complex-", Proceedings of The 6th Japan-Russia Joint Symposium on Computation Fluid Dynamic, pp.108-111(1998)

8)武本，岡，鬼頭，朝日，大倉：脱硫副産物の有効利用に関する調査研究，国際環境技術移転研究センター(ICETT)

Copyright © 2000 by JSCFD

pp.1-78 (2000)

Copyright © 2000 by JSCFD