

11. アジア地域における大排出源からの汚染物質の 輸送についてのシミュレーション

A SIMULATION MODEL OF ACIDIC MATERIAL TRANSFER FROM LARGE POINT SOURCES IN ASIA

八幡健人[†] ・ 松岡 譲[†]

Takehito YAHATA, Yuzuru MATSUOKA

ABSTRACT; If there is no control on energy use and engineering technology in the future, it will be a great deal of emission of acidic substances because of rapid industrialization. Given the policies of many Asian nations to achieve levels of development comparable with the industrialized world which necessitate a significant expansion of energy consumption (most derived from indigenous coal reserves) the potential for the formation of, and damage from, acid deposition in these developing countries is very high. This simulation model aims the analysis of transfer process of acidic substances and the estimation of deposition rate in Asia from the emission in large point sources and the weather condition in the year 1994.

KEYWORDS; Acidic Material Transfer, SO₂ Emission, Large Point Sources

1 はじめに

化石燃料によって生じる酸性雨の被害は、1960年代から北欧や米国北東部でみられるようになった。森林の大規模な衰退、湖沼の酸性化、建築物の腐食などの被害が問題になり、影響の解明や予測のための調査、対策が進められてきた。欧米に比べ、アジア諸国における被害は顕在化していないが、中国から飛来する酸性雨原因物質の我国への影響や、東南アジア諸国の熱帯雨林土壌の酸性化などが懸念されている。1989年秋に環境庁から発表された報告書によれば、我国においても、かなり酸性度の高い雨が、全国的に降っていることが明らかにされている。また、他のアジア諸国に関しては、ほとんど調査も行われていない。今後、アジア諸国、特に、中国、インドの工業化が規制や制御技術を伴わずに行われた場合には、土壌の酸性化や湖沼、森林に対する影響等の問題が顕在化してくることが予想される。

本シミュレーションでは、アジア地域を対象として、人為起源の酸性降下物、特に、大排出源から排出された硫酸化物の輸送・伝播・沈着過程を解析した。解析手法としては、計算機上での数値モデルを用いた。また、計算結果を動画化することによって、年間を通しての硫酸化物沈着の動向を定性的につかむことができた。

2 輸送モデル

2.1 シミュレーションモデルに使用した気象データ

気象データは、ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)が算出した風速(経度方向、緯度方向)、日降水量およびジオポテンシャルのデータを利用した。解析対象地域は、北緯60度から南緯15度の東経60度から東経160度であり、分解能は経度方向、緯度方向ともに0.5度メッシュである。データの時間間隔は、94年1月1日から94年12月31日までの6時間毎であり、500,700,850,925,1000(hpa)の5層についてのデータを利用した。

2.2 気象データの取り扱いについて

酸性物質の輸送に関しては、本解析では地上1000mの風を使用した。そのためECMWFより入手した風

[†] 名古屋大学工学部地圏環境工学専攻

速データを、地上 1000m の風速に内挿する必要がある。内挿は、ジオポテンシャルをもとに線形内挿によって行った。ジオポテンシャル E_G は、次式で表される。

$$E_G = \int_0^{z_0} g(z) dz$$

ここに、 $g(z)$: 重力加速度、 z : 幾何学的高度、 z_0 : 標高である。 $g(z)$ は一定値であると仮定し、 $9.8(\text{m/s}^2)$ とした。したがって、地上 1000m のジオポテンシャルは、次式で表される。

$$E_{G,1000} = E_{G,\text{surface}} + 9.8 \times 1000$$

地上 1000m 面の風速 u (経度方向) 及び v (緯度方向) は、1000m 面をはさむ 2 層 (気圧 a 及び $b(\text{hpa})$) の風速及びジオポテンシャルから次式を使用し求めた。その概念図を、図-1 に示す。

$$u = u(b) + \left\{ u(a) - u(b) \frac{E_{G,1000} - E_G(b)}{E_G(a) - E_G(b)} \right\}$$

$$v = v(b) + \left\{ v(a) - v(b) \frac{E_{G,1000} - E_G(b)}{E_G(a) - E_G(b)} \right\}$$

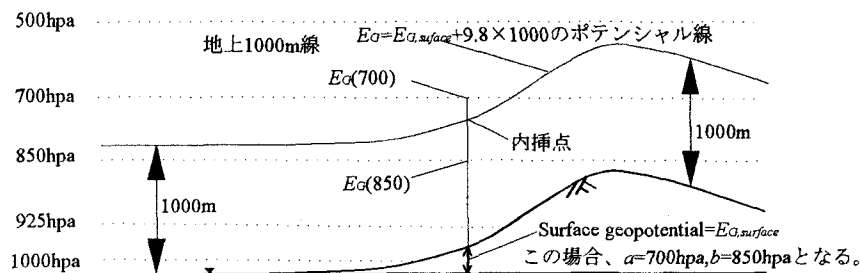


図-1 地上 1000m の風速データにするための内挿の概念図

2. 3 硫黄酸化物の輸送・変換過程

硫黄酸化物の輸送過程は、模式的に図-2 のように表せる。硫黄酸化物の沈着までの経過物質としては、 SO_2 、粒子状 SO_4^{2-} 、雲水中 SO_4^{2-} の 3 種類の状態を考慮し、それぞれの変化速度、沈着速度などのパラメータは、表-1 のように仮定した。

本シミュレーションでは、対象地域における 0.5 度メッシュの各格子点 (全 30351 点) の濃度変化を計算することが課題となる。メッシュ中の硫黄酸化物の濃度変化を 2 種類に分けてモデル化を行った。1 つは、風、拡散、排出による濃度変化であり、もう 1 つは、化学変化、雲水中への取り込み、乾性沈着、湿性沈着による濃度の変化である。前者は、オイラー型の輸送モデルを使用した。各格子において、 SO_2 、粒子状 SO_4^{2-} 、雲水中 SO_4^{2-} の 3 種類について次式により濃度の計算を行った。ここで、対象メッシュの面積を S 、各物質の濃度を C とする。ただし、3 物質とも硫黄換算量である。

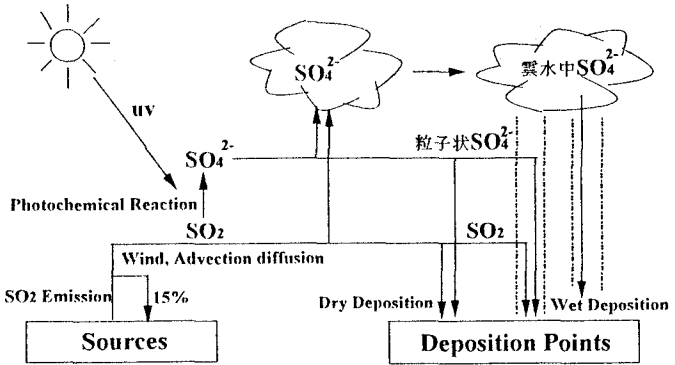
$$S \cdot h \frac{dC}{dt} = E_{in} - E_{out} + Q_p + D_p$$

ここに、 E_{in} は隣のメッシュからの風による流入量、 E_{out} は隣のメッシュへの風による流出量、 Q_p は同メッシュの排出量、 D_p は隣のメッシュからの拡散による流入量である。また、計算において結果の精度を上げるため、大気移動計算のタイムステップは 6 分ないしはそれ以下に設定した。計算時刻における風速データは、存在する前後のデータから時間的な内挿を行って使用した。

後者については、池田ら (1990) を参考とし、次のモデルを使用した。 SO_2 の濃度を q 、粒子状 SO_4^{2-}

表－１ 解析中のパラメータ

パラメータ	値	式中の記号
発生源と同じメッシュに沈着する割合	15%	a
$\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ の反応速度 夏季	0.03(1/h)	k_1
$\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ の反応速度 冬季	0.01(1/h)	k_1
排気中の SO_4^{2-} の割合	0%	b
SO_2 の雲への取り込み率	0.02(1/h)	k_4
粒子状 SO_4^{2-} の雲への取り込み率	0.02(1/h)	k_4'
雲水中 SO_4^{2-} の降水中への取り込み率	$100 \times I(1/h)$	k_5
SO_2 乾性沈着速度 昼	28.8(m/h)	k_3
SO_2 乾性沈着速度 夜	7.2(m/h)	k_3
粒子状 SO_4^{2-} 乾性沈着速度	3.6(m/h)	k_3'
SO_2 湿性沈着速度	$100 \times I(1/h)$	k_2
粒子状 SO_4^{2-} 湿性沈着速度	$100 \times I(1/h)$	k_2'
降水量	変数 (m/h)	I
混合高さ	地上1000(m)	h
拡散係数	0.003	d



図－２ 硫酸化物の輸送過程の模式図

の濃度を s 、雲水中 SO_4^{2-} の濃度を r とすると、それぞれの濃度変化は、表－１のパラメータを使って以下の式で表せる。ここに、濃度は硫黄換算量で示すこととする。

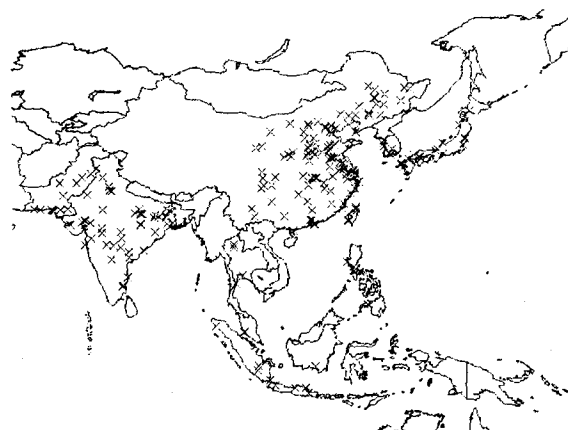
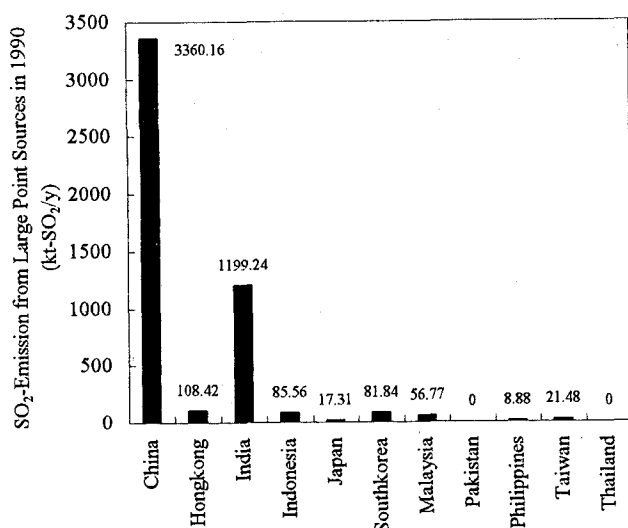
$$\begin{aligned}\frac{dq}{dt} &= -(k_1 + k_2 + \frac{k_3}{h} + k_4)q \\ \frac{ds}{dt} &= k_2q - (\frac{k_3}{h} + k_4')s \\ \frac{dr}{dt} &= k_4q + k_4's - k_5r\end{aligned}$$

これらの式から３物質の濃度が対象地域の全メッシュにわたって順次計算できる。したがって、各メッシュにおける SO_2 、粒子状 SO_4^{2-} 、雲水中 SO_4^{2-} の地表面沈着量 R_{p1} 、 R_{p2} 、 R_{p3} は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}R_{p1} &= (k_3 + k_2h)q + ahQ_s \\ R_{p2} &= (k_3' + k_2'h)s \\ R_{p3} &= k_5hr\end{aligned}$$

3 硫酸化物の排出量について

硫酸化物の排出源は、天然排出源と人為排出源に分けられる。人為排出源としては、硫黄分を含有した化石燃料の燃焼、非鉄金属の精錬などがある。天然排出源としては、火山の噴火、有機物の腐食などがある。本シミュレーションでは、人為排出源をさらに大排出源と面源に分け、前者を解析の対象とした。ここで、大排出源とは、供給電力が 500MW 以上の火力発電所、熱消費量が 1500MW 以上の工場、年間の SO_2 排出量が 2000ton 以上の施設を指す。本シミュレーションで対象とした排出量データでは、1990 年には、アジア地域の大排出源において約 5(Mt- SO_2 /y)、面源において 28(Mt- SO_2 /y) の排出があった。また、大排出源の全ては、火力発電所であった。大排出源からの排出は、他の排出源からの排出と比較し、その割合が高く、排出原因も明確で、対策も容易であると考えられる。したがって、大排出源からの排出による各地の汚染状況のシミュレーションを行うことは、排出量の削減対策を練る場合、重要になると考えられる。図－３は、1990年における国別の大排出源からの排出量である。図－４には、大排出源位置を示し



図－4 1990 年の大排出源の位置

図－3 1990 年の大排出源からの硫黄酸化物排出量

ており、全 250 点である。図－3 に記載されていない国（ベトナム、ラオス、カンボジア、バングラデシュ、スリランカ、ネパール、ブータン、朝鮮民主主義人民共和国、モンゴル、モルジブ、ミャンマー、ブルネイ、シンガポール）は、大排出源についての情報を得られなかったため記載していない。表－2 に、本シミュレーションのデータと他グループが算定したデータの比較を一覧する。

表－2 硫黄酸化物排出量の比較 (Mt-SO₂/y)

	基準年	発電部門	全部門
本シミュレーション	1990	4.9*	33.1
RIVM	1990	11.7	35.2
GEIA	1990	10.4	29.0

*大排出源のみ

4 解析結果

本シミュレーションでは、全域の沈着量を算定し、1年間を通して動画化を行った。それにより、大つかみではあるが、アジア全域の沈着の時間的、季節的動向を把握することができた。図－5、図－6 から分かるように、日本海側の沈着量は、冬季において大きく、それが年間沈着量の増大に大きく関わっている。図－7 には、アジア全域の年間沈着量を示す。大排出源が少ないにも関わらず沈着量が多い地方として、日本以外には、ネパール、ブータン、バングラデシュなどがある。また、日本海側、スーチョワン地方、ヒマラヤ山脈南部など、急峻な山脈のすそ野には、大きな沈着が出る傾向がある。

図－8、9、10、11 は、沈着量の季節的変動である。東アジア地域では、8月頃のみ、南東の季節風が卓越し、大陸からの影響はほとんどなくなる。しかし、この時期以外は、年間を通じて影響があることが分かる。また、動画を見ていると、9月には、中国南東部や、台湾などから台風によって引っ張られるようにして日本にやって来る汚染物質の沈着が見られる。

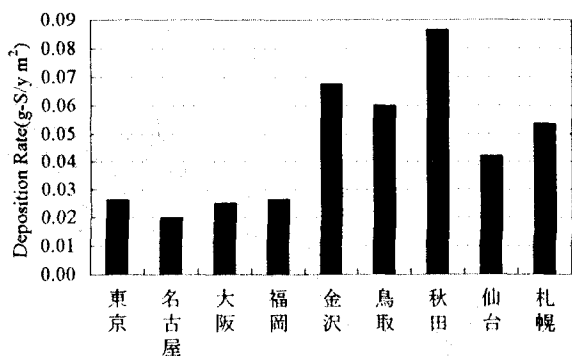


図-5 大排出源からの排出による
硫黄酸化物年間沈着量

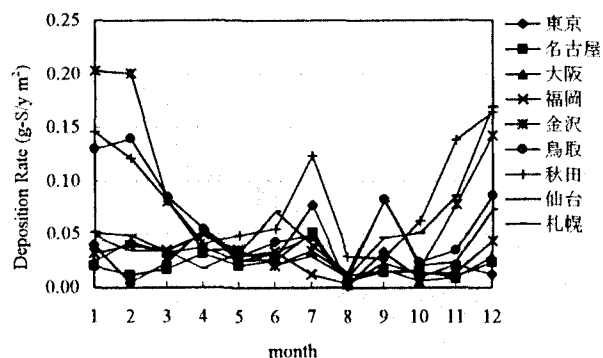
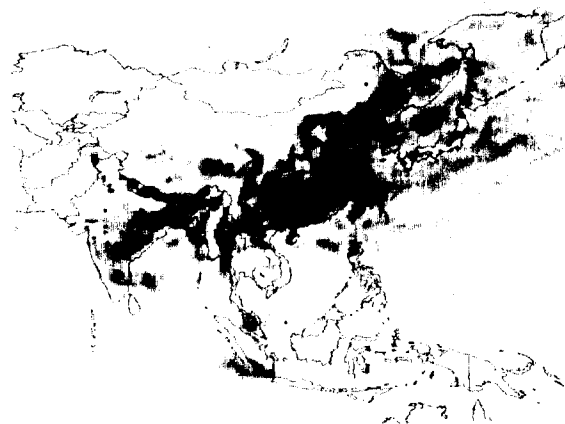
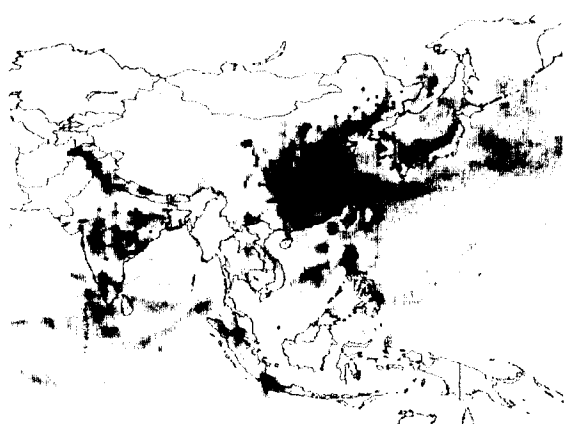
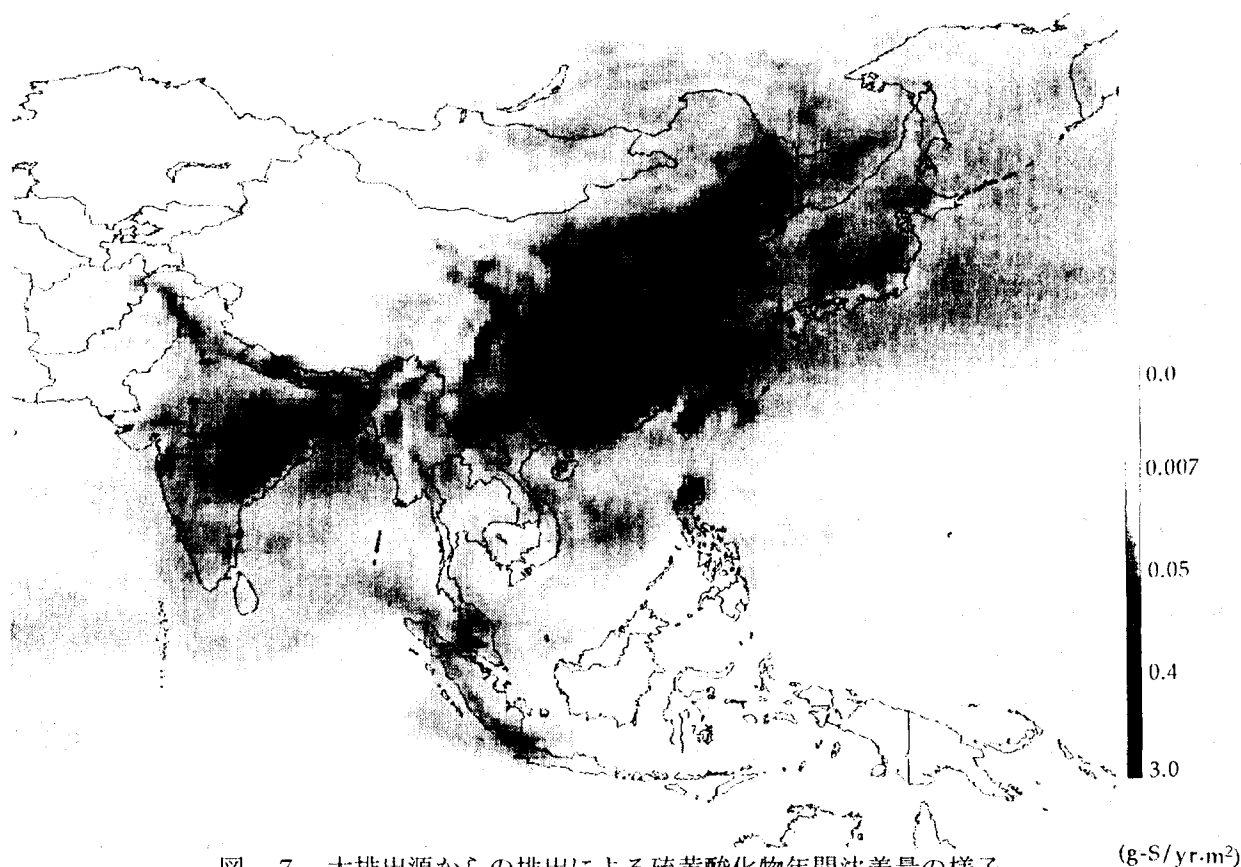
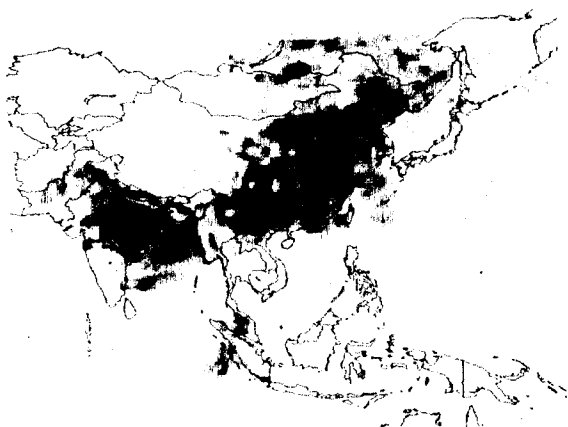
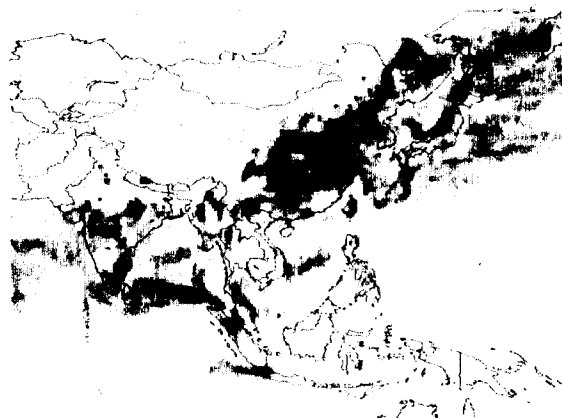


図-6 大排出源からの排出による
月平均硫黄酸化物沈着量の変動





図－１０ 大排出源からの排出による
硫黄酸化物沈着量の様子（８月）



図－１１ 大排出源からの排出による
硫黄酸化物沈着量の様子（１１月）

５ これからの課題

本シミュレーションでは、解析の対象を大排出源に限定したが、他の排出源種からの排出物の輸送・沈着過程も解析し、その寄与評価を行わなければならない。そのような解析は、対策を施すべき排出源種の優先順位の判断基準として重要になると考える。また、シミュレーションに利用したパラメータの値によって、結果は変わってくると考えられる。逐次、新しい情報を入手し、改良していかなければならない。シミュレーションの信頼性の向上のために、他年度の気象データについても、解析を行う必要がある。

参考・引用文献

- 1) ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts), 1992, Binary Data Representation
- 2) 池田有光、岡田直樹、平岡正勝ら、1989: 硫黄酸化物の長距離輸送、京都大学環境衛生工学会シンポジウム論文集、11,77-82.
- 3) I.Bertok, J.Cofala, Z.Klimont, W.Schopp, M.Amann, 1993: Structure of RAINS7.0 Energy and Emissions Database,IIASA
- 4) J.A.Bakkcs, O.Vaessen, J.W.van Woerden, 1994: Catalog of International Data Sets at RIVM, Nation Institute of Health and Environmental Protection Bilthoven The Netherlands
- 5) T.E.Gracdel, T.S.Bates, A.F.Bouwman, D.Cunnold, J.Dignon, I.Fung, B.K.Lamb, J.A.Logan, G.Marland, P.Middleton, J.M.Pacyna,M.Placet,and C.Veldt. 1993: A Compilation of Inventories of Emissions to the Atmosphere, Global Biogeochemical Cycles, vol.7, no.1,1-26
- 6) 八幡健人、1996: アジア地域における酸性物質の輸送と沈着に関する研究、名古屋大学卒業論文