



Title	長距離輸送モデルに関する研究
Author(s)	佐々木, 啓聡; 村尾, 直人; 片谷, 教孝 他
Description	第2回衛生工学シンポジウム (平成6年11月10日 (木) -11日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 2 モデル解析 . 2-7
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 2, 66-71
Issue Date	1994-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7586
Type	departmental bulletin paper
File Information	2-2-7_p66-71.pdf

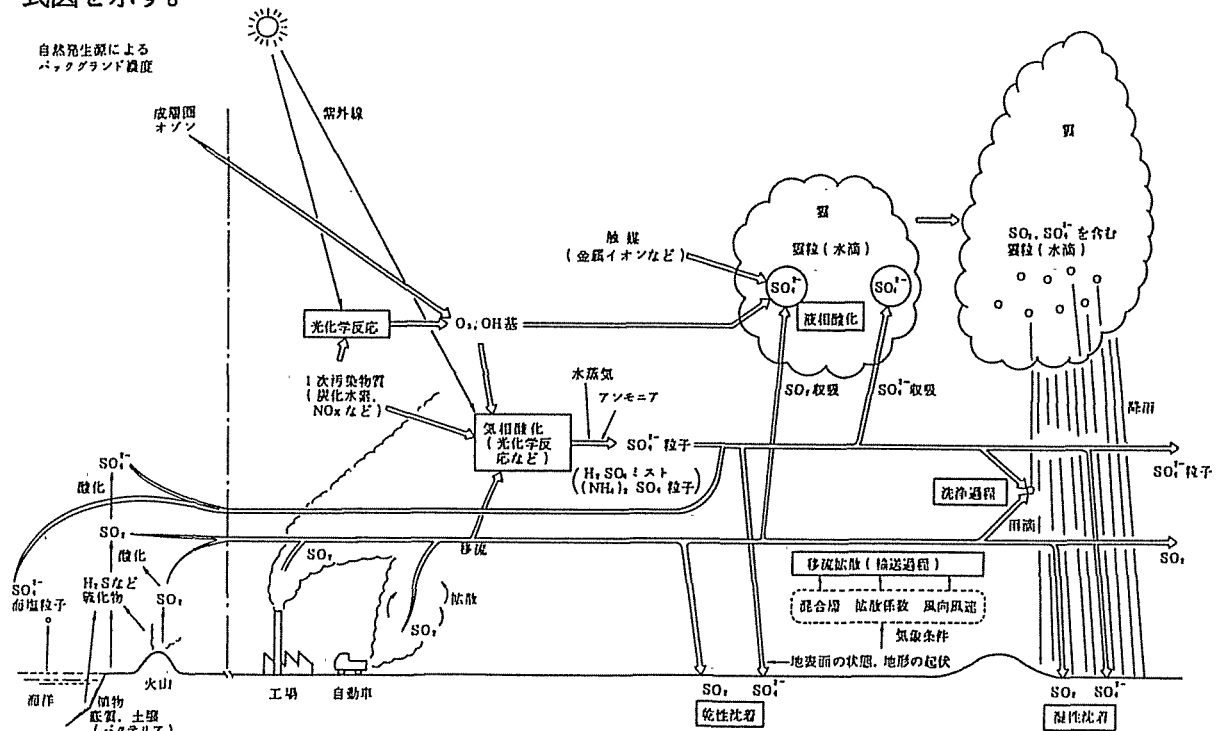


長距離輸送モデルに関する研究

○佐々木 啓聡 (富士通エフ・アイ・ピー(株))、村尾 直人 (北海道大学)
片谷 教孝 (山梨大学)、岡本 眞一 (東京情報大学)
小林 恵三 (㈱産業環境管理協会)

1. はじめに

酸性雨は、世界共通の地球環境問題として知られている。酸性雨の特徴は、長距離にわたる汚染物質の輸送が汚染機構の重要なプロセスであることである。このことが、酸性雨がいわゆる越境汚染問題の一つと言われる所以である。SO₂を中心とした長距離輸送・沈着過程の模式図を示す。



SO₂を中心とした長距離輸送・沈着過程の模式図

これまでの東アジアに関する酸性雨予測モデルについての研究報告はあまり多くない。片谷ら(1989)は東アジアにおける2次粒子の輸送に関する予備的検討として、流跡線解析を行っている。また、3次元オイラーモデルを用いた試算結果についてその一部を報告しており(片谷ら, 1992)、沈着速度が計算結果を大きく左右すること、火山から発生しているSO₂の影響が大きい等の結論を得た。さらに、これらの知見をふまえて、年間計算、海外の寄与率の試算、統計的流跡線モデルでの計算結果との比較を行った結果について報告した(1993)。今回は、この際の報告内容を整理して報告する。

2. 数式モデル

本研究で用いたモデルの概要を述べる。次ページに、本研究で用いた基礎方程式を示す。この式では、対象地域をメッシュに分割し、各メッシュ相互間の移流・拡散及び各メッシュ内における原因物質の排出、化学反応、沈着を順次計算することができる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C}{\partial t} = & - \frac{\partial u C}{\partial x} - \frac{\partial v C}{\partial y} - \frac{\partial \sigma C}{\partial \sigma} && \text{(移流)} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] && \text{(水平拡散)} \\
& + \left[\frac{g}{10^5 P^*} \right]^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\rho^2 K_z \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] && \text{(鉛直拡散)} \\
& + R_{\text{reaction}} && \text{(化学反応)} \\
& + E_{\text{mission}} && \text{(排出)} \\
& + D_{\text{eposition}} && \text{(沈着)}
\end{aligned}$$

C	濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
t	時間 (s)
x, y :	座標 (m)
σ :	座標 (σ 座標系)
u, v :	風速成分 (m/s)
$\dot{\sigma}$:	風速成分 (/s)
K_x, K_y :	水平方向拡散係数 (m^2/s)
K_z :	鉛直方向拡散係数 (m^2/s)
g :	重力加速度 (m/s^2)
P^* :	地表面と対象範囲上端の気圧差 (hPa)
ρ :	空気密度 (g/m^3)

ここで、鉛直方向の座標系としては σ 座標系を採用した。これは、地形の起伏を考慮し、地表面付近で細かい層分割を行う必要がある場合に有効な座標系で、次のようなものである。

$$\begin{aligned}
\sigma &= (P - P_{\text{TOP}}) / (P_s - P_{\text{TOP}}) \\
&= (P - P_{\text{TOP}}) / P^*
\end{aligned}$$

P :	高度 σ における気圧 (hPa)
P_s :	地表面における気圧 (hPa)
P_{TOP} :	上部境界面 (計算対象範囲の上限) における気圧 (hPa)

化学反応項は、 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ の一次酸化反応のみを考慮した。発生源からの排出による排出項は、各メッシュごとの排出強度から計算し、時間について一定とした。沈着項は、乾性沈着と湿性沈着とに分けられる。乾性沈着は地表面に接する層のみに寄与し、その濃度と乾性沈着速度から計算した。湿性沈着は各層での濃度と湿性沈着速度 (洗浄比) 及び層厚さから計算した。

本研究では、上述の基礎方程式を数値計算により解いた。数値計算法は、二次モーメント法及びCrank-Nicolson法である。

3. データ及び計算パラメータ

本研究での計算対象領域はおよそ3700×3000kmの範囲で、韓国、台湾及び中国を含む図1に示す領域である。日本付近は40kmメッシュ、その他は240kmメッシュで分割した。また、鉛直方向の上限は700hPa (≒3km) とし、10層に分割した。

風データは次のものを使用した。

- ・エアロロジカルデータ (特異点)
- ・日本域客観解析データ

これらの風データの計算点を図1に示す。計算にあたっては、これらの風データを鉛直及び水平方向に補間して使用した (片谷ら, 1990)。

降水データは次のものを使用した。

- ・国内：AMeDAS (1時間値)
- ・国外：世界気象資料MT (気象庁) の特別日別降水量

これらの降水データの測定点を図2に示す。

発生源データは、国内については固定発生源、移動発生源別のデータを都道府県別の排出量の集計値をもとに国土数値情報の土地利用データを用いてメッシュ配分し、火山からの排出量も考慮した。国外については、各国において集計された排出量が得られる場合はそれをを用い、得られない場合は一次エネルギー消費量から推計し、メッシュに配分した。ロシアの発生源データは取り込んでいない。全層合計値のメッシュ別分布を図3に示す。

拡散係数及び沈着速度については、文献値を用いた。水平拡散係数は、Gifford(1982) に従い、 $2.0 \times 10^4 (m^2/s)$ とした。鉛直拡散係数は、 $0.2 \sim 10.0 (m^2/s)$ で季節別、時刻別、高度別に与えた (Shannon, 1981)。乾性沈着速度は、Stewart(1983)、Shannon(1981) 及び藤田(1990)に従い、土地利用及び時刻別に与えた。

SO_2 : $0.39 \sim 1.69 (cm/s)$

SO_4^{2-} : $0.02 \sim 0.50 (cm/s)$

湿性沈着速度は、降水強度 $R (mm/h)$ の関数として

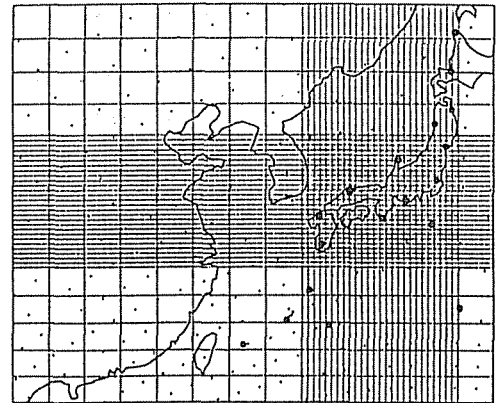


図1 Objective region of model calculation and Wind data points

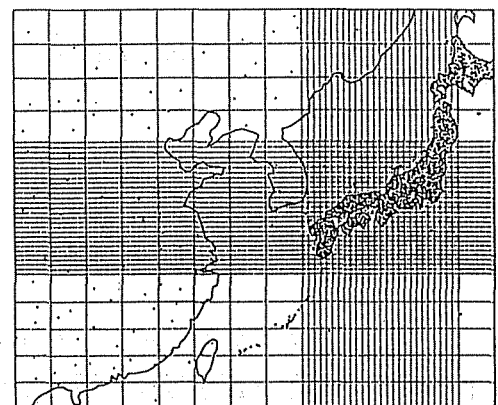


図2 Rainfall data points

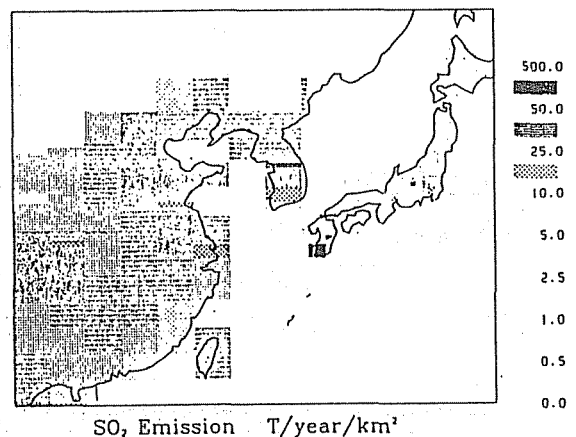


図3 Emission data for each grid

与えた (Van Dop, 1986)。

$$SO_2 : 2.0 \times 10^{-5} R (/s)$$

$$SO_4^{2-} : 2.0 \times 10^{-4} R (/s)$$

これらの値には、いわゆるwashout (洗浄) 及び rainout (降下) の効果が含まれている。

4. 計算結果及び考察

年間計算による SO_2 及び SO_4^{2-} それぞれの沈着量分布を図4及び図5に示す。 SO_2 は中国内陸部の四川省付近、北部の山東省付近、韓国北部及び九州南部に降下量が多く分布しており、一般的に中国から朝鮮半島、関東以西の日本の降下量が多い。一方、 SO_4^{2-} は、中国から朝鮮半島にかけては SO_2 と同様であるが、日本国内では特に本州の日本海側と九州の降下量が多い傾向が見られる。これは、冬季における季節風と降水量 (降雪量) が作用していると考えられる。しかしながら、図6に示す収支計算結果を見ると、国内の人為発生源と火山からの寄与は、国外からのそれとほぼ同じであることがわかる。

図7に、関東周辺の SO_4^{2-} 年間沈着量の月平均値について、計算値と実測値を比較した結果を示す。実測値は、(財)産業環境管理協会によって、1987年10月12日から1年間にわたって自動降水サンプラーを用いて採取、測定されたものである。実測値との相関はあまり高いとは言えないものの整合性は必ずしも悪いとは言えない。

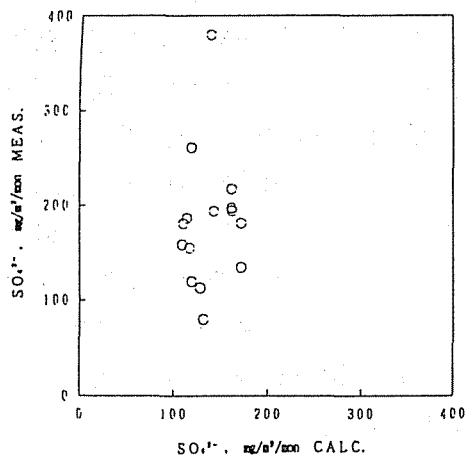


図7. Correlation of calculated and observed annual SO_4^{2-} deposition (1987.10-1988.10) (indicated by monthly mean value)

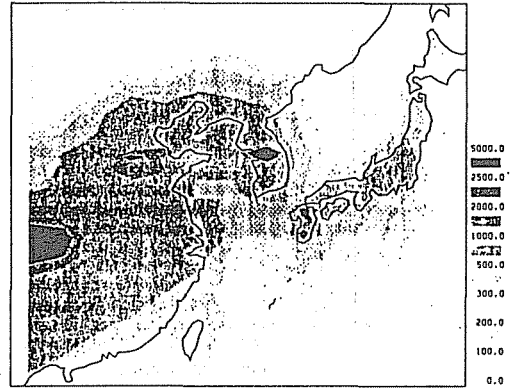


図4. Distribution of calculated annual deposition of SO_2 (1987.10-1988.10, mg/m^2)

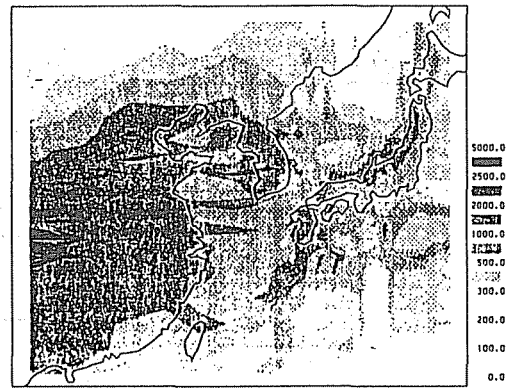


図5. Distribution of calculated annual deposition of SO_4^{2-} (1987.10-1988.10, mg/m^2)

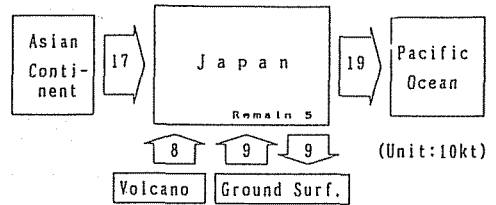


図6(a). Calculated budget of sulfur oxides around Japan (1988.2)

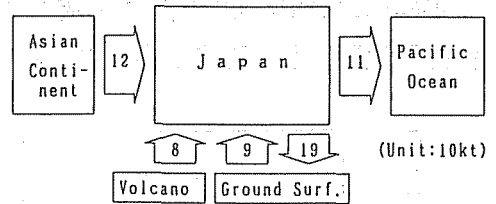


図6(b). Calculated budget of sulfur oxides around Japan (1987.8)

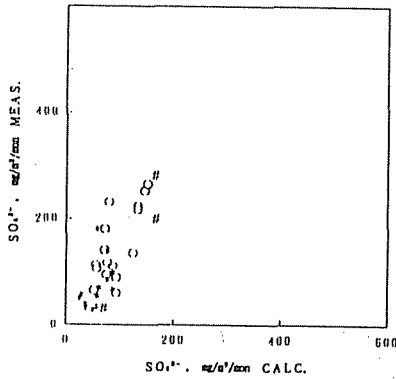


図 8 Correlation of calculated and observed monthly SO_4^{2-} deposition (1988.2)

あまり高い相関が得られていない理由の一つとして、ここで対象とした測定点が関東の比較的狭い領域に集中しており、モデル（メッシュサイズ）の分解能が十分でないことが考えられる。一方、環境庁（1990）によりほぼ日本全国にわたって調査された測定結果があり（1988年3月まで）、この実測値との比較を毎月ごとに行った。その一例を図8に示すが、比較的良い一致が得られている。

次に、各調査地点における国外発生源寄与率の試算を行った。発生源データとして海外発生源データのみを用いて計算し、その結果得られた沈着量を海外からの寄与分とみなす方法をとった。

発生量と濃度の関係が線型でないため、このような仮定は厳密には正確でないが、予備的計算としては十分であると考えられる。その結果を表1に示す。

表 1 日本における硫黄酸化物の沈着量の海外発生源の寄与率（1988.2）

地域	調査地点	沈着量	寄与率(%)
九州	長崎	219	68
日本海側	菰	261	79
	石川	529	89
太平洋側	高知	90	44
	名古屋	102	19
	東京	176	17
	仙台	56	23
内陸	京都	248	27
	飯田	66	26

冬季において、日本海側で寄与率が高い傾向がある。日本における酸性雨は、国内発生源と海外発生源からの両方の排出によるものと考えられるが、その割合はまちまちである。また、国内発生源のほぼ半分が火山による排出であるという

ことを考慮する必要がある。

最後に、統計的流跡線モデルで計算した結果との比較を行った結果を図9に示す。入力データは同じものを使った。多少ばらつきが見られるものの、2つの計算結果は比較的良い一致を示している。ばらつきは、沈着量の計算法の相違によるものと考えられる。オイラーモデルではメッシュごとに異なる沈着速度と降水量によって計算しているが、統計的流跡線モデルではこのような扱いができないという相違がある。

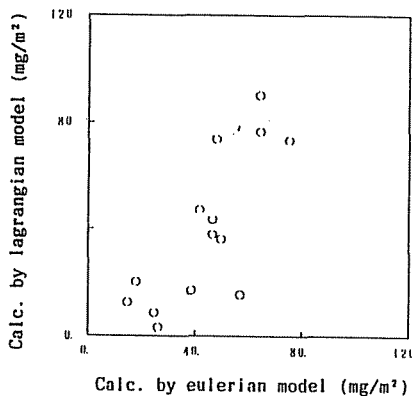


図 9 Correlation of monthly SO_4^{2-} deposition calculated by eulerian model and by lagrangian model (1988.2)

5. おわりに

3次元オイラーモデルによる東アジアを対象とした長距離輸送モデルの研究を行った。年間計算値は、実測値とほぼ同じレベルであった。また、日本での沈着量に対する海外からの寄与率の試算を行った。寄与率は地点により様々な値が得られたが、冬季に15~90%であったのに対し、夏季では低かった。統計的流跡線モデルとの比較では、沈着量の計算に関する相違点があるにも関わらず、良い一致が得られた。

6. 謝辞

ここに、発表の機会を与えてくださった関係者の方々に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Shannon D.A. (1981); A model of regional longterm average sulfur atmospheric pollution, surface removal and net horizontal flux., Atmos. Environ., 15, 689-701.
- 2) Gifford F.A. (1982); Horizontal diffusion in the atmosphere - a lagrangian dynamic theory., Atmos. Environ., 16, 505-512.
- 3) Stewart D.A., Morris R.E., Liu M.K. and Henderson D. (1983); Evaluation of an episodic regional transport model for a multiday sulfate episode., Atmos. Environ., 17, 1225-1252.
- 4) Van Dop H. (1986); Regional and long-range transport of air pollution., Elsevier Sci. Publishers B.V., Netherland, pp413.
- 5) (株)産業環境管理協会(1988); 酸性降下物等二次粒子汚染予測手法開発研究調査報告書 — 長距離輸送モデルの検討 —
- 6) (株)産業環境管理協会(1989); 酸性降下物等二次粒子汚染予測手法開発研究調査報告書 — 乾性及び湿性降下物の測定結果 —
- 7) 片谷 教孝, 村尾 直人, 岡本 眞一, 小林 恵三(1989); Trajectory Analysis for prediction of long-range transport of pollutants in Japan., Proc. 8th World Clean Air Congress(Den Hage), 3, 343-348.
- 8) 片谷 教孝, 村尾 直人, 岡本 眞一, 小林 恵三(1990); "長距離輸送モデルに関する研究(3) — オイラー型モデル適用の試み —", 第31回大気汚染学会講演要旨集, 367.
- 9) 藤田 慎一, 高橋 章, 村治 能孝(1990); "わが国における硫黄酸化物の乾性沈着量に関する検討", 大気汚染学会誌, 25(5), 343-353.
- 10) 市川 陽一, 藤田 慎一(1990); "東アジアにおける硫黄酸化物の長距離輸送モデルの開発", (財)電力中央研究所所報, T89407.
- 11) 環境庁大気保全局(1990); 酸性雨対策調査報告書
- 12) Kotamarthi V.R. and Carmichael G.R. (1990); The long range transport of pollutants in the Pacific Rim Region., Atmos. Environ., 24A, 1521-1524.
- 13) 片谷 教孝, 村尾 直人, 岡本 眞一, 小野 憲仁, 小林 恵三(1992); A modeling study on acid deposition and secondary aerosols in eastern Asia., Proc. 9th World Clean Air Congress(Montreal), 3, IU-16B-11.
- 14) 村尾 直人, 片谷 教孝, 佐々木 啓聡, 岡本 眞一, 小林 恵三(1993); A Modeling Study on Acid Deposition in East Asia., Proc. International Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia(Taipei), 305-309.