

【研究報告】

気象モデルを利用した東アジア広域における SO₂ 乾性沈着量の推計Estimation of SO₂ dry deposition in East Asian region
by using the meteorological model simulation

桜井達也***、大泉毅*、植田洋匡*

Tatsuya SAKURAI, Tsuyoshi OHIZUMI and Hiromasa UEDA

【要 約】 インファレンシャル法と EANET の観測データと組み合わせることによって、東アジア広域における SO₂ の乾性沈着量の推計を行なった。インファレンシャル法の入力データとして必要な気象要素は、EANET 測定局では実測が十分に行われていない現状であるため、本推計では気象モデルの MM5 を用いて必要な気象データを再現した。また、インファレンシャル法による乾性沈着速度の計算には MCIP と呼ばれるツールを利用した。本研究で推計の対象とした 2004 年では、SO₂ の観測値は中国において高濃度となっていることが確認できた。特に Chongqing では、他の地点と比較してその濃度は高い値であった。代表的なインファレンシャル法の 1 つである RADM の方法を適応し、乾性沈着量を算出した結果、湿性との合計沈着量に占める乾性の割合は無視できない値であると考えられた。結果、酸性沈着を評価する場合には、湿性沈着量と同様、乾性沈着量を定量する必要があることを改めて確認できた。

キーワード：EANET、MM5、乾性沈着、二酸化硫黄、インファレンシャル法

1. はじめに

酸性物質の沈着が及ぼす生態系への影響を評価するためには、湿性沈着と乾性沈着の両方を定量することが不可欠である。湿性沈着は測定が容易であるが、一方で、乾性沈着は沈着物質や沈着表面の性質及び気象条件に影響を受けるため、その実測は困難である。そのため、2001 年より本格稼動した「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET)」では、現在のところルーチ的な乾性沈着の測定方法は確立されておらず、乾性沈着量推計に必要なパラメーターとなるガス・粒子状物質の濃度測定を先行的に進めている段階である¹⁾。

濃度勾配法等に代表される直接測定法では、特殊な装置及びモニタリングに係る労力を多く必要とするため、ネットワークにおけるルーチン観測には適していない。

一方で、欧米においては、気象データ等から物質の沈着速度を推定し、濃度との積によって沈着量を推計する方法が多く用いられている。これは間接測定法の一つであり、インファレンシャル法とも呼ばれている²⁾³⁾⁴⁾。インファレンシャル法では直接測定法で必要とされる特殊な装置および労力を必要とせず、EANET のような広域観測網におけるルーチン観測に対して適した方法の一つとなり得る。事実、U.S. EPA が主導する CASTNet (Clean Air Status and Trends Network) では、インファレンシャル法によって乾性沈着量の推計および評価が進められている⁵⁾。

東アジアでは、主に直接測定法による乾性沈着量の研究が、森林や代理表面を対象として進められてきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。しかしながら、東アジア広域を対象とした乾性沈着量の評価はこれまでほとんど行われていない。そこで本研究では、インファレンシャル法と EANET の観測データと組み合わせることによって、東アジア広域における乾性沈着量の推計を行うことを目的とする。酸性物質の総沈着量の評価を進めるに当たり、まずは主要な酸性物質の 1 つである SO₂ について評価した結果を報告する。

* (財)日本環境衛生センター・酸性雨研究センター
Acid Deposition and Oxidant Research Center, JESC

** 日本学術振興会 特別研究員
JSPS Research Fellow

インファレンシャル法の入力データとして必要な気象要素は、EANET 測定局では実測が十分に行われていない現状である。そのため、本研究では気象モデルの MM5 (Fifth-generation Mesoscale Model of non-hydrostatic version)⁹⁾ を用いて必要な気象データを再現した。

2. 乾性沈着量の推計方法

2.1 気象要素の計算

本研究で用いた MM5 は、ペンシルベニア州立大学米国大気科学研究センター (PSU/NCAR) で開発された気象モデルであり、無償で提供されている。また、MM5 は米国環境保護庁 (US-EPA) が開発を進めている大気質モデル、Models-3/CMAQ (the Community Multi-scale Air Quality model)¹⁰⁾ の気象場再現モデルとなっており、広く利用されている。基本式は、流体の基礎方程式に基づいて大気の運動を計算する力学モデルと、力学モデルに現れる乱流項や非断熱加熱、雨滴の形成・消滅などを計算する物理モデルから構成される。

本研究における気象要素の再現計算は、北緯 21 度・東経 112 度を中心とした 8100×6300 km の東アジア領域全体をカバーする領域で行った。計算領域の座標系はランベルト等角円錐図法とし、計算格子は 45×45 km とした。鉛直座標は地形準拠座標系 (σ 座標系) とし、最上部 100hPa までを 21 層に分割した。最下層の高度は約 15m である。地形準拠座標系ではモデルの最下層が地表面に一致するため、山岳地域に代表されるような複雑な地形を比較的忠実に再現することができる。海面温度は米国海洋大気局 (NOAA) の週平均海面温度データを、気象要素の初期・境界値には気象庁の全球客観解析データ (GANAL; 経緯度 1.25 度格子、6 時間間隔) を、土地利用・地形標高は米国地質調査所 (USGS) の土地利用情報 (24 種類) を採用した。なお、土地利用情報は、各計算格子について 1 種類が割り当てられる。

計算対象期間は 2004 年の通年とし、同年における EANET 大気成分濃度観測値¹¹⁾ を用いて、各観測地点における SO₂ の乾性沈着量を推計した。図 1 に、計算対象領域および最新の情報として 2005 年次の EANET 測定地点をまとめる。

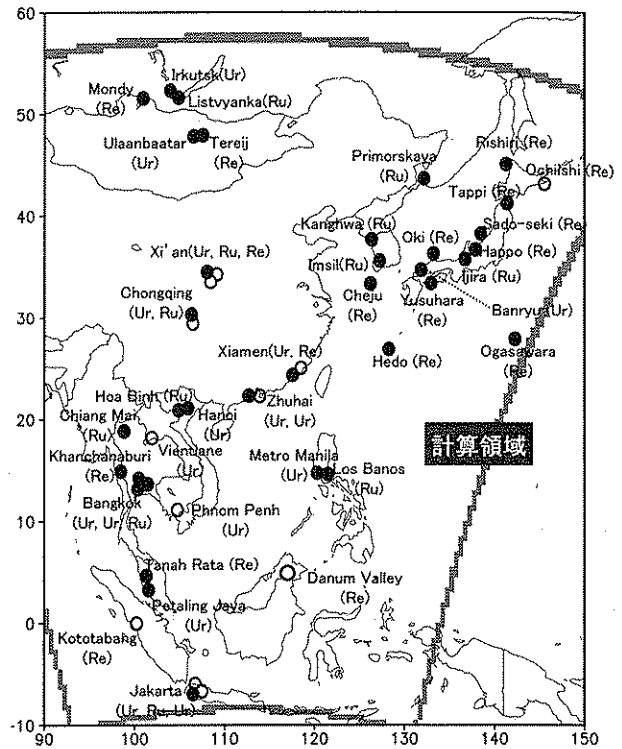


図 1 気象要素の計算対象領域および EANET 測定局の地点 (2005 年次)。●は湿性および大気濃度を、○は湿性のモニタリングのみを実施している局。

() 内は地点分類 (Ur: 都市, Ru: 田園, Re: 遠隔)

2.2 インファレンシャル法による乾性沈着量の計算

インファレンシャル法では、物質の濃度と沈着速度 (乾性沈着速度: V_d) の積によって、乾性沈着量を推計する。乾性沈着速度は、乾性沈着の過程を以下に示すような抵抗モデルで表現し、気象データ等を用いて計算される

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 R_a : 空気力学抵抗、 R_b : 準薄層抵抗、 R_c : 表面抵抗である。本研究では、代表的なインファレンシャル法の一つである RADM (Regional Acid Deposition Model) の方法³⁾ を適応し、乾性沈着速度を算出した。また、インファレンシャル法による乾性沈着速度の計算には MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)¹⁰⁾ と呼ばれるツールを利用した。MCIP は MM5 の出力データを Models-3/CMAQ の入力データに変換するプリプロセッサであり、変換を行なう際、MM5 で計算された気象要素からガス状成分の乾性沈着速度を算出する。乾性沈着量の推計では、MCIP で算出され

た沈着速度のうち、各測定地点を有する計算格子内の値を抽出し、濃度の観測値と掛け合わせた。

3. 結果と考察

3.1 各測定地点におけるSO₂の濃度とV_d

図2は、2004年におけるEANET各測定局のSO₂測定値および乾性沈着速度の計算値を年平均で示したものである。本解析では、大気濃度・湿性の両モニタリングデータの欠測率が、年間で20%以下であった地点を対象とした。結果、2004年次における対象地点は、図2横軸に示すような26地点となった。なお、横軸地点名末尾に記述されている数値は、表1にまとめたような、各測定地点を有する計算格子の土地利用情報を示したものである。

土地利用情報は、乾性沈着速度の計算に必要な入力データの1つである。MM5では24種類の土地

利用情報を考慮して気象要素の再現計算を行うが、RADMの抵抗モデルでは11種類の土地利用に対して乾性沈着速度の計算を行う。そのため、元々の24種類が、MCIPによる計算過程において、表1に示すような11種類に集約され、乾性沈着速度の計算が行われている。

2004年におけるSO₂の観測値では、中国において高濃度となっていることが確認できる。特にChongqingでは他の地点と比較して高濃度であった。一方、乾性沈着速度は土地利用情報が水面(7番)となった計算格子において、値が大きくなる傾向となった。これは、SO₂が水に対して溶解性が高いことに起因する。実際の測定局は水面上に位置していないが、ここでは、土地利用情報を水面のままとし、かつ計算格子内に存在する測定局の観測値が、その格子内の濃度を代表しているとみなすことで、格子全体を対象とした乾性沈着量の評価を行なうこととした。

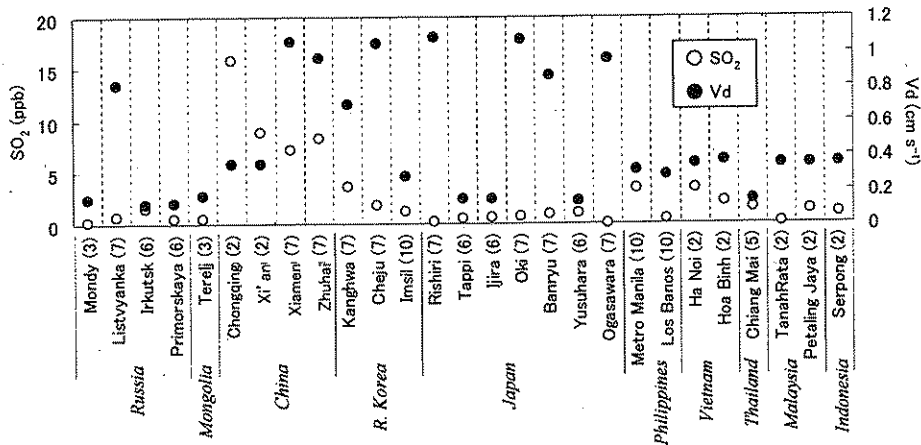


図2 2004年におけるEANET各測定局のSO₂年平均測定値および乾性沈着速度の年平均計算値。
()内の数値は表1に示した土地利用情報

表1 RADMで考慮される土地利用情報

Land Use Type
1. Urban Land
2. Agriculture
3. Range
4. Deciduous Forest
5. Coniferous Forest
6. Mixed Forest and Wet Land
7. Water
8. Barren Land
9. Non-forest Wet Land
10. Mixed Agriculture/Range Land
11. Rock, Open Shrub

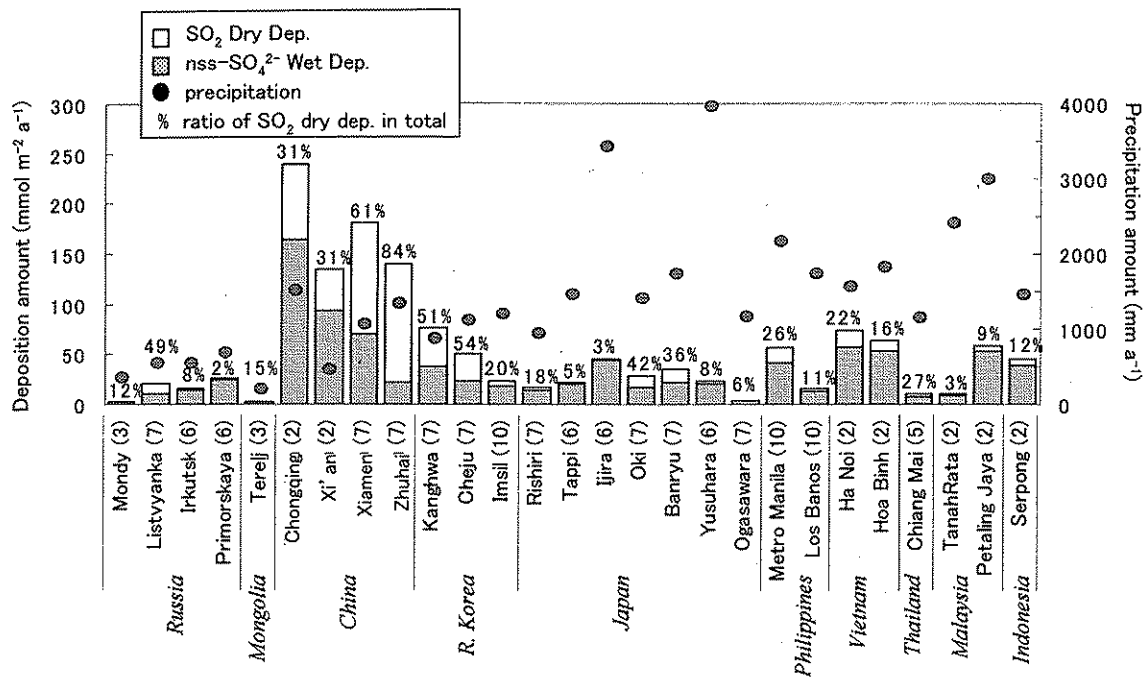


図3 2004年におけるEANET各測定局のSO₂年間乾性沈着量、nss-SO₄²⁻年間湿性沈着量および年間降水量

3.2 乾性沈着量の推計結果および湿性沈着量との比較

図3は、2004年におけるEANET各測定局のSO₂年間乾性沈着量、nss-SO₄²⁻年間湿性沈着量および年間降水量を示したものである。中国の4地点では、他地点と比較して合計した沈着量が非常に多い結果となった。うち、XiamenおよびZhuhaiの2地点では、全体に占める乾性沈着量の割合は、それぞれ61%及び84%にも及ぶ結果となった。加えて、ロシアのListvyanka、韓国のKanghwa並びにChejuにおいても、全体の半分程度を占めている。中国と韓国では大気中におけるSO₂濃度が高いこと、Listvyankaでは降水量が少ないことなどが要因として挙げられるが、土地利用情報が水面となった格子において、乾性沈着速度の値が大きくなり、乾性沈着量も多くなる傾向も現れている。

SO₂の場合、その沈着速度は沈着面のぬれの効果によって増加するため、沈着速度の計算にはぬれの影響を加味する必要があることが指摘されている^{12) 13)}。本研究で採用したRADMの方法では、沈着面のぬれの影響は考慮されていないため、水面以外の土地利用情報を持つ計算格子内では、乾性沈着速度が過小評価されている可能性がある。しかしながら、このような過小評価が示唆される状況下においても、本推計結果では、合計の沈着量に占める乾性沈着量の割合は無視できない値であると考えられる。

果、酸性沈着を評価する場合には、湿性沈着量と同様、乾性沈着量を定量する必要があることを改めて確認できた。

4. まとめ

インファレンシャル法とEANETの観測データと組み合わせることによって、東アジア広域におけるSO₂の乾性沈着量の推計を行なった。インファレンシャル法の入力データとして必要な気象要素は、EANET測定局では実測が十分に行われていない現状であるため、本推計では気象モデルのMM5(Fifth-generation Mesoscale Model of non-hydrostatic version)を用いて必要な気象データを再現した。また、インファレンシャル法による乾性沈着速度の計算にはMCIP(Meteorology-Chemistry Interface Processor)と呼ばれるツールを利用した。

本研究で推計の対象とした2004年では、SO₂の観測値は中国において高濃度となっていた。特にChongqingでは、他の地点と比較してその濃度は高い値であった。代表的なインファレンシャル法の1つであるRADM(Regional Acid Deposition Model)の方法を適応し、乾性沈着量を算出した結果、総沈着量に占める乾性沈着量の割合は無視できない値であると考えられた。結果、酸性沈着を評価する場合には、湿性沈着量と同様、乾性沈着量を定量する必

要性があることを改めて確認できた。

本推計で採用した RADM の方法は北米を対象に開発されたモデルであるため、沈着過程で考慮される抵抗のうち、表面抵抗 (R_s) を算出する計算式には北米でみられる季節ごとにパラメーター化された変数が含まれている。よって、今後はそれらパラメーターを東アジア地域ごとに最適化すること、また、沈着面のぬれの効果を推計に取り入れることなどが必要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、明星大学の松田和秀助教授より助言を頂いた。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) EANET (2005): Second edition of the Strategy Paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET
- 2) Hicks, B.B. et al. (1987): A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities. *Water, Air, and Soil Pollution* 36, pp311-330.
- 3) Wesely, M.L. (1989): Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional scale, numerical models. *Atmos. Environ.* 23, pp1293-1304.
- 4) Erisman, J.W. (1994): Evaluation of a surface resistance parameterization of sulphur dioxide. *Atmos. Environ.* 28, pp2583-2594.
- 5) Baumgardner R.E. et al. (2002): Estimates of the atmospheric deposition of sulfur and nitrogen species: Clean Air Status and Trends Network, 1990-2000. *Environmental Science and Technology* 36, pp2614-2629.
- 6) 高橋 章ら (2004) : 濃度勾配法による森林への粒子状物質の沈着速度の推定. *大気環境学会誌* 39, pp54-62.
- 7) 藤田 慎一 (2006) : 代理表面法を用いた二酸化硫黄と硝酸の乾性沈着量の推定 II. *大気環境学会誌* 41, pp175-182.
- 8) Matsuda, K. et al. (2006): Deposition velocity of O_3 and SO_2 in the dry and wet above a tropical forest in northern Thailand. *Atmos. Environ.* 40, pp7557-7564.
- 9) Grell, G.A. et al. (1994): Description of the Fifth Generation Penn state/NCAR Meso-scale Model. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.
- 10) Byun, D. W. et al. (1999): Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. U. S. EPA, EPA-600/R-99/030.
- 11) Network Center for EANET (2005): Data Report on the Acid Deposition in the East Asian Region 2004.
- 12) Erisman, J.W. et al. (1993): Continuous measurements of surface exchange of SO_2 and NH_3 ; implications for their possible interaction in the deposition process. *Atmos. Environ.* 27A, pp1937-1949.
- 13) 高橋 章ら (2002) : インファレンシャル法による森林への硫黄化合物の乾性沈着量の推定. *大気環境学会誌* 37, pp192-205

Summary

SO_2 dry deposition amount in East Asian region was estimated by using EANET monitoring data in 2004 and RADM method, which is one of the representative inferential methods. Necessary meteorological factors as input data for the inferential method were prepared based on the meteorological model simulation because of the insufficiency of the meteorological monitoring data in EANET. Moreover, MCIP, which is one of the tools in Models-3/CMAQ, was made use of the calculation of the dry deposition velocity. It was found that SO_2 concentration was relatively high at Chinese sites in 2004. Especially, the higher concentration was appeared at Chongqing. In the estimation of the dry deposition amount, it was suggested that the ratio of the dry deposition amount could not be ignored in total. As a result, it could be clarified that the dry deposition should be taken into account for the evaluation of the impacts caused by acid deposition.